



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών

Σύνθετα Υλικά. Μέθοδοι κατεργασίας και εφαρμογές τους στη Ναυπηγική.

(Διπλωματική Εργασία)

Όνοματεπώνυμο: Καραχισαρίδης Ευστάθιος

A.M.: 51115038

Επιβλέπων Καθηγητής: Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας

Αθήνα, 2021

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΡΑΧΙΣΑΡΙΔΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ
Αριθμός μητρώου: 51115038

Σύνθετα Υλικά. Μέθοδοι κατεργασίας και εφαρμογές τους στη Ναυπηγική.
(ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ)

Composite materials. Fabrication methods and marine applications.
(DIPLOMA THESIS)

Εξεταστική Επιτροπή:

Ιακωβίδης Ισίδωρος
(Λέκτορας)

Θεοχάρη Σταματίνα
(Αναπληρώτρια Καθηγήτρια)

Μαζαράκος Θωμάς
(Επίκουρος Καθηγητής)

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καραχισαρίδης Ευστάθιος του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 51115038 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Καραχισαρίδης Ευστάθιος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Ισίδωρο Ιακωβίδη, λέκτορα του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, για τη βοήθεια και τον χρόνο που αφιέρωσε στη διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου αλλά και το φιλικό μου περιβάλλον για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
Κεφάλαιο 1.	5
1.1 Ιστορική αναδρομή	5
1.2 Ορισμοί και γενικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών	7
1.3 Κατηγορίες συνθέτων υλικών	8
1.3.1 Μητρική φάση.....	9
1.3.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκων	15
1.3.3 Ενίσχυση σε μορφή ινών.....	16
1.4 Πυρήνες	28
1.4.1 Αφρώδη υλικά ως πυρήνας	28
1.4.2 Ξύλο ως πυρήνας.....	29
1.4.3 Κυψελαιοειδή υλικά ως πυρήνας.....	30
1.5 Πλεονεκτήματα συνθέτων υλικών στην ναυπηγική	31
1.6 Μειονεκτήματα συνθέτων υλικών στην ναυπηγική	33
Κεφάλαιο 2.	35
2.1 Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων συνθέτων υλικών	35
2.1.1 Εξισώσεις ισορροπίας.....	36
2.1.2 Σχέσεις παραμορφώσεων - μετατοπίσεων.....	36
2.1.3 Εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων	37
2.1.4 Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης.....	37
2.1.5 Μηχανική συμπεριφορά στρώσης	39
2.1.6 Περιορισμοί των μηχανικών ελαστικών σταθερών	41
2.1.7 Κλασσική θεωρία πολύστρωτων	42
2.1.8 Καταστατικές εξισώσεις πολύστρωτου	42
2.2 Τρόποι και κριτήρια αστοχίας σύνθετων υλικών	45
2.2.1 Κριτήρια αστοχίας στρώσης.....	53
2.3 Πειραματικές μέθοδοι μελέτης μηχανικών ιδιοτήτων	59
2.3.1 Πειραματικές δοκιμές μέτρησης ιδιοτήτων. Καταστροφικές μέθοδοι	59
2.3.2 Μη καταστροφικές μέθοδοι για την ανίχνευση ατελειών	61
2.4 Οι πιο συχνές μέθοδοι κατεργασίας σύνθετων υλικών στην ναυπηγική	63
2.5 Πρότυπα και οδηγίες νηογνωμόνων	67

2.5.1 Νηογνώμονας <i>Bureau Veritas</i>	68
2.5.2 Νηογνώμονας LLOYDS	94
2.5.3 Νηογνώμονας DNV-GI.....	106
B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	117
Κεφάλαιο 3	117
3.1 Σκοπός- στόχοι	117
3.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε	117
3.3 Διαδικασία κατασκευής δοκιμών	120
3.4 Μέθοδοι ελέγχου των δοκιμών	125
3.4.1 Δοκιμασία σε μονοαξονικό εφελκυσμό.....	125
3.4.2 Δοκιμασία Κάμψης	125
3.4.3 Δοκιμασία κρούσης	126
3.4.4 Δοκιμή Καύσης (<i>Burn off test</i>).....	127
3.4.5 Προσομοίωση δοκιμασίας εφελκυσμού και κάμψης	127
3.5 Πειραματικές δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων.....	128
Κεφάλαιο 4	132
4.1 Αποτελέσματα	132
4.1.1 Αποτελέσματα δοκιμασίας εφελκυσμού.....	132
4.1.2 Αποτελέσματα δοκιμασίας κάμψης τριών σημείων	137
4.1.3 Αποτελέσματα δοκιμής κρούσης	141
4.1.4 Αποτελέσματα δοκιμασίας καύσης (<i>Burn off test</i>)	141
4.1.5 Υπολογισμός μηχανικών ιδιοτήτων με βάση τους κανονισμούς του Lloyds.....	142
4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων	143
Κεφάλαιο 5	145
Συμπεράσματα	145
Παράρτημα Α	148
Αποτελέσματα προσομοίωσης	150
Βιβλιογραφία	157

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των σύνθετων υλικών έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη σε ποικίλες τεχνολογικές εφαρμογές και τομείς, συμπεριλαμβανομένης και της ναυπηγικής, κυρίως για την κατασκευή μικρών σκαφών αλλά και επιμέρους εξαρτημάτων. Το χαρακτηριστικό που έστρεψε το ενδιαφέρον των σχεδιαστών προς αυτά οφείλεται στο συνδυασμό των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων με το χαμηλό βάρος αυτών των υλικών. Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι το γεγονός πως μπορεί να επιτευχθεί τοπική ενίσχυση με αποτέλεσμα να παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας βέλτιστων κατασκευών. Όσον αφορά το μέλλον των σύνθετων υλικών στην ναυτιλία αναμένεται να είναι πολλά υποσχόμενο λόγω των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν, αλλά και της συνεχιζόμενης έρευνας που πραγματοποιείται στον τομέα ανάπτυξης νέων σύνθετων υλικών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται τα σύνθετα υλικά καθώς και οι μέθοδοι κατασκευής και εφαρμογής τους στη Ναυπηγική βιομηχανία.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται στοιχεία της θεωρίας των σύνθετων υλικών, διατυπώνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί και περιγράφονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται εκτενέστερη αναφορά στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων, σε μεθόδους κατασκευής και σε τρόπους αστοχίας των υλικών αυτών. Επίσης παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τους κανονισμούς που αφορούν τα σύνθετα υλικά και προέρχονται από τρεις από τους μεγαλύτερους νηογνώμονες του χώρου.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η πειραματική διαδικασία κατασκευής δοκιμών σύνθετων υλικών με ενισχυτικά υαλοϋφάσματα και εποξική ή πολυεστερική ρητίνη.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών των ελέγχων των δοκιμών που κατασκευάστηκαν.

Τέλος στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και αναπτύσσονται ιδέες και προτάσεις για την μελλοντική συνέχιση της παρούσης εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετο υλικό, Μητρική φάση, Ενίσχυση, Υαλοϋφασμα, Πυρήνας, Κριτήρια αστοχίας, Κανονισμοί νηογνώμονα.

ABSTRACT

The use of composite materials has experienced great development in a variety of technological applications and sectors, including shipbuilding, mainly for the construction of small boats and individual components. The feature that attracted the attention of designers is the combination of very good mechanical properties with the low weight of these materials. An additional feature of composite materials is the fact that local reinforcement can be achieved, thus enabling the creation of optimal structures. Regarding the future of composite materials in shipbuilding, it is expected to be very promising due to the special advantages they offer but also because of the ongoing research carried out in the field of development of new composite materials.

In the present dissertation, the composite materials as well as the methods of their processing and application in the shipbuilding industry are presented.

In chapter 1, elements of the theory of composite materials are presented together with the required definitions. In addition, the particular characteristics as well as the advantages and disadvantages of composite materials used in shipbuilding are discussed.

In chapter 2, a detailed description of the mechanical properties of the composites is carried out. Processing methods and failure modes of these materials are described. In addition, data concerning the composite materials are presented, according to the regulations issued from three of the largest shipbuilding classification societies.

In chapter 3, the experimental process of manufacturing composite specimens using glass fabric reinforcement and epoxy or polyester matrix is described.

In chapter 4, the results of the laboratory tests performed on the manufactured specimens are presented and discussed.

Finally, in chapter 5, the conclusions of the study are summarized. Certain proposals and suggestions for a future research relative to the subject of the present work are presented.

Keywords: Composite material, Matrix, Reinforcement fibers, Fiberglass cloth, Core, Failure criteria, Classification society rules.

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ανθρώπινη εξέλιξη έχει συνδεθεί άμεσα με την δημιουργία εργαλείων και κατασκευών οι οποίες του έδωσαν την δυνατότητα να μπορεί να αντιμετωπίσει τις φυσικές του αδυναμίες. Ο τρόπος για την δημιουργία εργαλείων αλλά και κατασκευών που έχει υιοθετήσει ο άνθρωπος βασίζεται στην αξιοποίηση υλικών. Αρχικά ο άνθρωπος μπορούσε να εκμεταλλεύεται μόνο τα υλικά που έβρισκε στην φύση χωρίς επεξεργασία παρόλα αυτά με το πέρασμα του χρόνου άρχισε να αναπτύσσει διάφορες τεχνικές παραγωγής και επεξεργασίας με αποτελέσματα να προκύπτουν υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες. Τα τελευταία περίπου 100 χρόνια ο άνθρωπος πέτυχε να κατανοήσει σε σημαντικό βαθμό τη σχέση των δομικών στοιχείων των υλικών με τις ιδιότητές τους. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο να αναπτυχθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα ένας τεράστιος αριθμός νέων υλικών κατάλληλων να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της κάθε εποχής. Ορισμένα από αυτά τα υλικά περιλαμβάνουν μέταλλα, πλαστικά, κεραμικά και γυαλιά σε διάφορες μορφές (κοκκώδη, πλάκες, ίνες κ.λπ.).

Ένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα στο χώρο της ναυτιλίας, που καταδεικνύει την αξία της μελέτης των υλικών ως προς τις ιδιότητες και τις μεθόδους κατεργασίας τους, είναι η αστοχία των χαλύβδινων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλοία τύπου *Liberty* κατά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο. Εκείνη την εποχή οι μηχανικοί θεωρούσαν τον χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε επαρκώς όγκιμο υλικό, χωρίς να γίνουν ουσιαστικές μελέτες της αντοχής του σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας με συνέπεια να μην προβλεφθεί το γεγονός της ψαθυρής θραύσης και της αστοχίας της κατασκευής. Ωστόσο η εμπειρία αυτή οδήγησε σε μια νέα αντίληψη, στο να λαμβάνεται υπόψη σε μεγαλύτερο βαθμό η σημασία της μελέτης των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών, γεγονός που οδήγησε στη κατασκευή καλύτερων πλοίων.

Η ταξινόμηση των υλικών όπως τα γνωρίζουμε σήμερα μπορεί να γίνει στις εξής κυρίες κατηγορίες με βάση τη χημική τους σύσταση και τη δομή τους:

- Μέταλλα
- Κεραμικά
- Πολυμερή

Επιπλέον υπάρχουν τα σύνθετα που αποτελούν συνδυασμό ενός ή περισσοτέρων υλικών. Αυτά παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στον τομέα των κατασκευών και αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσης εργασίας λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν στον χώρο της ναυτιλίας.

Η πρώτη αναφορά για χρήση των ινωδών σύνθετων υλικών σε κατασκευή μικρών σκαφών εντοπίζεται το 1940 από το ναυτικό των ΗΠΑ [1]. Αργότερα με την χρήση νέων μεθόδων όπως της επίστρωσης με το χέρι (*hand lay-up*) αυξήθηκε η παραγωγή μικρών σκαφών από *GRP* έως και 80% την περίοδο 1952 έως 1972 στην Μεγάλη Βρετανία [1].

Στις μέρες μας τα ινώδη σύνθετα υλικά και κυρίως αυτά με ίνες γυαλιού (*GRP*) χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στην κατασκευή μικρών σκαφών αλλά και σε μικρότερο βαθμό, σε μεγαλύτερα σκάφη, τα οποία διαθέτουν υψηλά έξαλλα επειδή με τη χρήση τέτοιων υλικών επιτυγχάνεται χαμηλότερο κέντρο βάρους της κατασκευής, σε σχέση με τα παραδοσιακά ναυπηγικά υλικά. Οι λόγοι που έχουν οδηγήσει στην προτίμηση των υλικών αυτών είναι κυρίως η μειωμένη απαιτούμενη συντήρηση σε σχέση με άλλα υλικά, η ευκολία κατασκευής σκαφών σε γραμμή παραγωγής και η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων σχημάτων γάστρας και εξαρτημάτων. Τα ινώδη σύνθετα υλικά στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πολλών τύπων σκαφών, όπως είναι τα μικρά σκάφη, αλιευτικά, μεγαλύτερα επιβατηγά και φορτηγά, πολεμικά, σκάφη υψηλής απόδοσης, υποβρύχια οχήματα, υπερκατασκευές καθώς και για την κατασκευή διάφορων εξαρτημάτων, όπως πτερύγια, θόλοι ραντάρ, άξονες και έλικες. Πρέπει να τονιστεί πως σκάφη με πιστοποιημένη ποιότητα κατασκευής έχει αποδειχτεί ότι πάρα τα μεγάλα χρονικά διαστήματα έκθεσης τους σε φορτία και περιβαλλοντικές επιδράσεις, δεν εμφανίζουν σημαντικές ενδείξεις υποβάθμισης των ιδιοτήτων τους

ενώ το απαιτούμενο κόστος για την συντήρηση αυτών των σκαφών είναι σχετικά μικρότερο σε σύγκριση με άλλα σκάφη. Τέλος, το φαινόμενο της κόπωσης σύνθετων υλικών δεν έχει αναφερθεί ως σημαντική αιτία αστοχίας στον χώρο της ναυπηγικής, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητα των υλικών αυτών.

1.2 Ορισμοί και γενικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη (φάσεις), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους. Γενικά, ως σύνθετο υλικό μπορούμε να πούμε πως ορίζεται κάθε πολυφασικό υλικό το οποίο επιδεικνύει σε μεγάλο ποσοστό τις ιδιότητες των επιμέρους συστατικών του φάσεων, ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συνδυασμός των ιδιοτήτων τους [2]. Για τα σύνθετα υλικά ισχύει η αρχή της συνδυασμένης δράσης, σύμφωνα με την οποία οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού που παράγεται αποτελούν συνδυασμό των ιδιοτήτων των επιμέρους φάσεων. Επομένως λαμβάνοντας υπόψη ότι θα πρέπει να γίνονται ορισμένοι συμβιβασμοί, στη βάση της προαναφερθείσας αρχής, οι ιδιότητες του υλικού που κατασκευάζεται είναι αποτέλεσμα που προκύπτει από τον επιλεκτικό συνδυασμό των δύο ή περισσότερων διακριτών υλικών.

Η δομή ενός υλικού μπορεί να μελετηθεί με γυμνό οφθαλμό (μακροσκοπικά) ή με τη χρήση ειδικών οργάνων όπως τα μικροσκόπια (μικροσκοπικά). Πολλές φορές στις ναυπηγικές εφαρμογές ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μακροσκοπική εξέταση της δομής των υλικών εφόσον η μικροσκοπική, λόγω των εξειδικευμένων οργάνων που απαιτούνται και του αυξημένου κόστους, δεν προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Οι ιδιότητες ενός υλικού δεν καθορίζονται από το σχήμα και το μέγεθος του, αλλά από το ίδιο καθαυτό το υλικό και αποτελούν κριτήρια επιλογής του υλικού για την εκάστοτε εφαρμογή. Επιπλέον καθορίζουν τη διάρκεια ζωής, τη λειτουργικότητα και την καταλληλότητα ανάλογα με το κατασκευαστικό στοιχείο για το οποίο προορίζεται. Οι βασικές ιδιότητες που μπορούμε να παρατηρήσουμε στα στερεά υλικά διακρίνονται σε μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμικές, μαγνητικές, οπτικές και εκείνες που μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση.

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού καθορίζονται κυρίως από τη συμπεριφορά του υπό την παρουσία τάσεων. Οι σπουδαιότερες μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται ως κύρια χαρακτηριστικά αξιολόγησης είναι το μέτρο ελαστικότητας (*Young's modulus*), η δυσκαμψία (*toughness*) και η αντοχή του (*strength*).

Εκτός από τη δομή και τις ιδιότητες, δύο επιπλέον βασικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη όταν εξετάζεται κάποιο υλικό είναι οι επεξεργασίες που έχει υποστεί και η αποδοτικότητά του, με την τελευταία να είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων του.

1.3 Κατηγορίες συνθέτων υλικών

Τα σύνθετα υλικά ως μια ξεχωριστή κατηγορία εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα με σκοπό να καλύψουν την ανάγκη των κατασκευαστών για υλικά που θα καλύπτουν τις σύγχρονες και αυξανόμενες κατασκευαστικές απαιτήσεις σε πολλούς τομείς. Στη ναυπηγική η ανάγκη αυτή εξυπηρετείται από πολυφασικά σύνθετα υλικά όπως τα ενισχυμένα πολυμερή με υαλόνημα (*fiberglass*), ενισχυμένα πολυμερή με ίνες από άνθρακα κτλ. Στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται συνήθως σύνθετα υλικά που αποτελούνται κυρίως από δύο φάσεις [2]. Η μία απ' αυτές ονομάζεται **συνεχής φάση** ή **μήτρα** και περιβάλλει την άλλη φάση, η οποία ονομάζεται **ενίσχυση** ή **διεσπαρμένη φάση**. Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού εξαρτώνται από το συνδυασμό των δύο επιμέρους φάσεων. Το ποσοστό της κάθε φάσης στο σύνθετο, αλλά και άλλοι παράγοντες όπως η γεωμετρία των σωματιδίων της διεσπαρμένης φάσης, το μέγεθος, η κατανομή και ο προσανατολισμός τους μέσα στο σύνθετο καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του. Πρέπει να σημειωθεί ότι σύνθετα είναι επίσης ορισμένα πολυφασικά υλικά όπως κράματα μετάλλων, κεραμικά, πολυμερή, το ξύλο και τα οστά, χωρίς όμως να αναφερόμαστε σ' αυτά με τη συνήθη χρήση του όρου σύνθετα υλικά.

Τα σύνθετα υλικά τα οποία φέρουν ενίσχυση σε μορφή κόκκων χαρακτηρίζονται ως ιστροπικά, επειδή εμφανίζουν τις ίδιες τιμές ιδιοτήτων σε κάθε διεύθυνση. Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ίνας χαρακτηρίζονται ως ορθοτροπικά,

λόγω των διαφορετικών τιμών των ιδιοτήτων που εμφανίζουν σε διαφορετικές διευθύνσεις, εξαιτίας της διαφορετικής γεωμετρίας και του προσανατολισμού των ινών.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα σύνθετα υλικά τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη ναυπηγική τεχνολογία και είναι τεχνητά, δηλαδή δεν συναντώνται στη φύση με τη μορφή που επιθυμεί ο κατασκευαστής να τα χρησιμοποιήσει. Τα πιο συνηθισμένα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική είναι αυτά που αποτελούνται από μια συνεχή φάση (μήτρα) και μια ασυνεχή φάση (ενίσχυση), η οποία αποτελείται από ίνες, γεγονός που καθορίζει το χαρακτηρισμό τους ως ινώδη σύνθετα υλικά.

Τα πολυμερή ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούν την βασικότερη κατηγορία σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία. Ως σύνθετα ινώδη υλικά πολυμερούς μήτρας ορίζουμε αυτά που αποτελούνται από μια πολυμερή ρητίνη ως μήτρα και ίνες ως το μέσο ενίσχυσης. Τα υλικά αυτά συνήθως ταξινομούνται ανάλογα με τον τύπο της ενίσχυσης (π.χ. γυαλί, άνθρακας, αραμίδιο). Συχνά η ενίσχυση που χρησιμοποιείται στα σκάφη είναι σε μορφή υφάσματος (*Fabric*) για το οποίο χρησιμοποιείται και ο όρος *Roving*.

1.3.1 Μητρική φάση

Η μήτρα επιτελεί σημαντικό ρόλο στο σύνθετο καθώς αποτελεί το συνδετικό παράγοντα μεταξύ των ινών, μεταφέρει αλλά και διανέμει τις εξωτερικά εφαρμοζόμενες τάσεις σε αυτές [2-6]. Η μητρική φάση έχει μειωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με την ενίσχυση, συνεπώς μπορεί να δεχθεί μόνο πολύ μικρό ποσοστό του φορτίου που ασκείται στο σύνθετο. Ένας σημαντικός ρόλος της μήτρας είναι η προστασία των ινών από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος μέσου, όπως είναι οι επιφανειακές βλάβες και η φθορά από επίδραση χημικών ουσιών.

Η μητρική φάση των ινωδών σύνθετων υλικών μπορεί να είναι μεταλλική, πολυμερής ή κεραμική, όμως σε κάθε περίπτωση έχει μεγαλύτερη πλαστικότητα από αυτή της ενισχυτικής φάσης. Η πλαστικότητα της μήτρας, έχει ως αποτέλεσμα να

συμβάλλει σημαντικά στην μείωση της διάδοσης ρωγμών. Σε έναν σημαντικό αριθμό περιπτώσεων αστοχίας τα ινώδη σύνθετα υλικά, χάρη στην μήτρα, μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμα και αν ένα ποσοστό των ινών έχει υποστεί θραύση.

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της μήτρας είναι οι συγκολλητικές δυνάμεις μεταξύ αυτής και των ινών της ενίσχυσης. Σε περίπτωση εξασθένησης των δυνάμεων συνοχής ανάμεσα στο υλικό της μήτρας και την ενίσχυση, μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο εξώθησης (*pull-out*) των ινών.

Οι βασικές κατηγορίες μήτρας είναι οι ακόλουθες:

- Θερμοπλαστικές: είναι πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες, όπως το πολυαιθυλένιο (*PE*) και το πολυστερένιο (*PS*) που έχουν χαμηλό κόστος και για αυτό χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό.
- Θερμοσκληρυνόμενες: αυτές περιλαμβάνουν πολυεστερικές, εποξικές ή φαινολικές ρητίνες και χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν υψηλότερες απαιτήσεις.

Η μήτρα είναι το υλικό που καθορίζει την μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του τελικού προϊόντος, επειδή είναι λιγότερο ανθεκτική σε μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν στα πρώτα στάδια σχεδίασης.

Στην ναυπηγική, και κυρίως αυτή των μικρών σκαφών, στις περιπτώσεις ενίσχυσης με ίνες γυαλιού, συνήθως χρησιμοποιείται για τη μητρική φάση πολυεστερική, βινυλεστερική ή εποξική ρητίνη. Η πρώτη και η δεύτερη αποτελούν την πιο συχνή επιλογή, εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους αλλά και του γεγονότος ότι το ιξώδες των εποξικών ρητινών συχνά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Η αντοχή της μήτρας επηρεάζεται από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Η αστοχία της μήτρας συνδέεται άμεσα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της, ενώ ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ινών. Καινοτομία των τελευταίων ετών αποτελεί η εμπορική διαθεσιμότητα πολυεστερικής ρητίνης σε μείγμα με

βινυλεστερική, με αποτέλεσμα να έχουμε μήτρα με υψηλές μηχανικές ιδιότητες, παραπλήσιες με αυτές της εποξικής.

Οι εποξικές ρητίνες σε αντίθεση με τις πολυεστερικές δεν περιέχουν στυρένιο, το οποίο είναι τοξικό, περιέχουν όμως άλλες τοξικές ουσίες οι οποίες κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης εκλύονται στο περιβάλλον υπό την μορφή αερίων. Για το λόγο αυτό, οι χώροι που πραγματοποιείται η κατασκευή – σκλήρυνση με εποξικές ρητίνες θα πρέπει να αερίζονται επαρκώς.

Υλικά πολυμερούς μήτρας στην ναυπηγική

Στην ναυπηγική συχνότερα χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας, με ρητίνες πολυεστερικής, βινυλεστερικής ή εποξικής φύσης, με τις τελευταίες να είναι υψηλότερου κόστους, αλλά να παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή στην υγρασία. Σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται πολυαμιδικές ρητίνες.

Η ποιότητα πολυμερισμού μπορεί να ελεγχθεί ως εξής:

- Ρυθμίζοντας την ποσότητα του επιταχυντή (εντός καθορισμένων ορίων) για πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες.
- Ρυθμίζοντας την ποσότητα του σκληρυντή στις εποξικές ρητίνες.
- Ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την διαδικασία πολυμερισμού.

Η επιτάχυνση της σκλήρυνσης της ρητίνης συνήθως γίνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και την άσκηση πίεσης. Πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που χρησιμοποιούν ακτίνες-Χ, μικροκύματα ή δέσμες ηλεκτρονίων για το σκοπό αυτό. Η τελευταία μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση λεπτών πολύστρωτων. Κατά την μέθοδο αυτή, οι στρώσεις του υλικού εκτίθενται στην επίδραση ακτινοβολίας που παράγεται από ιοντισμό με δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία οδηγεί σε πολυμερισμό της ρητίνης. Ακτίνες-Χ και μικροκύματα λειτουργούν με

παρόμοιο τρόπο. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπεριώδης ακτινοβολία (UV) εφόσον η ρητίνη είναι διαπερατή από το φως.

Σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις ρητίνες πολυμερούς μήτρας είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, T_g (*glass transition temperature*) του πολυμερούς. Στη θερμοκρασία αυτή η κινητικότητα των μακρομορίων περιορίζεται σε τέτοιο βαθμό, ώστε το υλικό της μήτρας χάνει την πλαστικότητα και γίνεται ψαθυρό.

Η T_g εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευαστική διαδικασία που ακολουθείται. Στις εποξικές ρητίνες, η θερμοκρασία T_g μπορεί να αυξηθεί μετά το πρώτο στάδιο του πολυμερισμού.

Οι διαφορές μεταξύ πολυεστερικής, βινυλεστερικής και εποξικής ρητίνης είναι οι ακόλουθες:

- Στις πολυεστερικές ή βινυλεστερικές ρητίνες έχουμε ανάμιξη μιας μερικώς πολυμερισμένης ρητίνης με ακόρεστο μονομερές το οποίο διασυνδέει τις αλυσίδες των μακρομορίων της ρητίνης σχηματίζοντας σταθερή τρισδιάστατη δομή. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται ένας καταλύτης, ο οποίος επιταχύνει τη χημική αντίδραση διασύνδεσης των αλυσίδων. Η αντίδραση αυτή συνήθως είναι εξώθερμη.
- Στις εποξικές ρητίνες έχουμε ανάμιξη της ρητίνης με κατάλληλο μέσο (σκληρυντής) ο οποίος προκαλεί τον πολυμερισμό της ρητίνης και συμμετέχει στη διαδικασία.

Η χρήση διαφορετικών ρητινών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στις τελικές μηχανικές ιδιότητες αλλά κυρίως στη συρρίκνωση όγκου και την διάρκεια του πολυμερισμού.

Πολυεστερικές ρητίνες

Οι μήτρες από πολυεστέρα είναι αποτέλεσμα ανάμειξης ακόρεστης πολυεστερικής ρητίνης με ακόρεστο μονομερές, παρουσία καταλυτή και (μερικές φορές) επιταχυντή. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας τυπικής πολυεστερικής ρητίνης είναι [5]:

- Υψηλή συρρίκνωση όγκου κατά τον πολυμερισμό, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού χημικών δεσμών που σχηματίζονται κατά τη διασύνδεση των μακρομορίων της πολυεστερικής ρητίνης και των μορίων του μονομερούς στυρένιου.
- Παραμόρφωση σε σημαντικό βαθμό.
- Μικρή αντοχή στην απορρόφηση νερού μέσω φαινομένων ώσμωσης.

Βινυλεστερικές ρητίνες

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία πολυμερισμού με τις πολυεστερικές ρητίνες. Οι βινυλεστερικές διαφέρουν ως προς τη χημική τους δομή από τις πολυεστερικές ακόρεστες ρητίνες στα ακόλουθα [5]:

- Στις θέσεις των εστερομάδων και άλλων δραστικών ομάδων της αλυσίδας του μακρομορίου.
- Στον αριθμό των εστερομάδων κατά μήκος της αλυσίδας του μακρομορίου (είναι μικρότερος στις πολυεστερικές ρητίνες).

Τα βασικά χαρακτηριστικά μια τυπικής βινυλεστερικής ρητίνης είναι:

- Χαμηλότερη συρρίκνωση όγκου κατά την διαδικασία πολυμερισμού σε σύγκριση με την πολυεστερική μήτρα.
- Μεγαλύτερη αντίσταση στην απορρόφηση νερού σε σχέση με την πολυεστερική.
- Μεγαλύτερο όριο παραμορφώσεων από την πολυεστερική.

- Καλύτερες συγκολλητικές ιδιότητες, οι οποίες οφείλονται στην παρουσία πολικών ομάδων που μπορούν να σχηματίσουν εύκολα χημικούς δεσμούς διασύνδεσης των μακρομορίων.

Εποξικές ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες περιέχουν μακρομοριακές αλυσίδες πολυμερούς στο άκρο των οποίων βρίσκεται η δραστική ομάδα. Ο πολυμερισμός γίνεται με μηχανισμό προσθήκης και επιτυγχάνεται με δύο τρόπους [5]:

1. Με την προσθήκη κατάλληλης χημικής ένωσης η οποία χαρακτηρίζεται ως σκληρυντής. Αυτή συνήθως είναι μια πολυαμίνη ή ανυδρίτης οξέος.
2. Με θέρμανση σε κατάλληλη θερμοκρασία. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει πολυμερισμός λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, κάτι που μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να συμβεί και με απλή έκθεση στον ήλιο, χωρίς την παρουσία σκληρυντή.

Οι εποξικές ρητίνες δεν χρειάζονται την παρουσία άλλου υλικού (μονομερούς ή πολυμερούς) για το σχηματισμό της σταθερής τρισδιάστατης δομής κατά τη σκλήρυνση. Αυτό επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος με την αύξηση της θερμοκρασίας σε δεύτερη φάση του πολυμερισμού (*post-curing*).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των εποξικών ρητινών είναι:

- Χαμηλή ογκομετρική συρρίκνωση κατά την διάρκεια του πολυμερισμού.
- Υψηλότερο όριο παραμόρφωσης (και όριο διαρροής) σε σχέση με τις πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες.
- Υψηλότερη αντίσταση στην απορρόφηση νερού λόγω της απουσίας εστερομάδων στα μακρομόρια.
- Καλές συγκολλητικές ιδιότητες.

1.3.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκων

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκων χωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες: αυτά στα οποία η ενίσχυση αποτελείται από μεγάλο μεγέθους κόκκους και αυτά στα οποία έχουμε ενίσχυση διασποράς. Συνήθως, η κοκκώδης φάση είναι σκληρότερη και έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία από το υλικό της μήτρας. Τα σύνθετα υλικά με κόκκους χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική κυρίως για την κατασκευή εξαρτημάτων και όχι για καίρια δομικά στοιχεία της συνολικής κατασκευής.

Σύνθετα υλικά με κόκκους μεγάλου μεγέθους

Οι μαθηματικές σχέσεις (1.1) και (1.2) δίνουν το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου σε σχέση με το κλάσμα όγκου και τα μέτρα ελαστικότητας των συνιστωσών φάσεων, στην περίπτωση διφασικού σύνθετου υλικού με ενίσχυση κόκκων [2]. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν από τον κανόνα των αναμείξεων και δίνουν τη μέγιστη (*upper*) και την ελάχιστη (*lower*) τιμή του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου:

- Ανώτερο όριο μέτρου ελαστικότητας για ένα σύνθετο υλικό δύο φάσεων:

$$E_{c(u)} = E_m V_m + E_p V_p \quad (1.1)$$

- Κατώτερο όριο μέτρου ελαστικότητας για ένα σύνθετο υλικό δύο φάσεων:

$$E_{c(l)} = (E_m V_p) / (V_m E_p + V_p E_m) \quad (1.2)$$

Στις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις τα σύμβολα E και V δηλώνουν το μέτρο ελαστικότητάς και το κλάσμα όγκου αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες αναφέρονται στο σύνθετο υλικό (c), στη μήτρα (m) και στη κοκκώδη φάση (p).

Σύνθετα υλικά με ενίσχυση διασποράς

Στην ενίσχυση με διασπορά οι κόκκοι έχουν μέγεθος $0.01 - 0.1 \mu m$ και είναι συγκριτικά πολύ μικρότεροι σε σχέση με τους μεγάλο μεγέθους κόκκους. Στην περίπτωση αυτή οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ μήτρας και κόκκων λαμβάνουν χώρα σε

μοριακό επίπεδο. Η μήτρα φέρει το μεγαλύτερο ποσοστό του εφαρμοζόμενου φορτίου ενώ οι διεσπαρμένοι κόκκοι εμποδίζουν τις παραμορφώσεις του σύνθετου.

1.3.3 Ενίσχυση σε μορφή ινών

Ως ίνες ορίζονται τα πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά με μικρή διάμετρο σε σχέση με το μήκος τους. Ως ινώδης φάση ορίζεται αυτή στην οποία η ενίσχυση του σύνθετου αποτελείται από ίνες. Ένα βασικό πλεονέκτημα που δίνουν οι ίνες μικρής διαμέτρου είναι ότι είναι πολύ πιο ανθεκτικές από το αντίστοιχο υλικό κατασκευής τους. Λόγω της μικρής διαμέτρου συχνά η ίνα της ενίσχυσης αντιμετωπίζεται ως ισοτροπικό υλικό παραβλέποντας την ύπαρξη επιφανειακών ατελειών. Όσον αφορά τη διάμετρο και τον τύπο, οι τύποι ινώδους ενίσχυσης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες [2]:

- Βελόνες.
- Ίνες.
- Σύρματα.

Βασικό χαρακτηριστικό των βελονών είναι ότι ο λόγος του μήκους προς την διάμετρο έχει πολύ υψηλές τιμές. Λόγω του πολύ μικρού μεγέθους οι βελόνες είναι σχεδόν απαλλαγμένες ατελειών γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή. Το μεγάλο οικονομικό κόστος καθώς και η δυσκολία ενσωμάτωσης αυτών στη μήτρα είναι οι λόγοι που δεν προτιμώνται για χρήση σε μεγάλο εύρος εργασιών. Ίνες μεγάλης διαμέτρου χαρακτηρίζονται ως σύρματα.

Στην περίπτωση που ο λόγος του μήκους της ίνας ως προς την διάμετρο της είναι μεγάλος (μεγαλύτερος από 100) η ίνα χαρακτηρίζεται ως μακριά ή συνεχής (*Continuous fiber*), ενώ όταν ο λόγος αυτός είναι μικρός (μικρότερος του 100) τότε χαρακτηρίζεται ως κοντή ή ασυνεχής (*Discontinuous fiber*). Το μειονέκτημα των ασυνεχών ινών είναι ότι δεν μπορεί να καθοριστεί με σαφήνεια ο προσανατολισμός τους, με αποτέλεσμα να έχουν τυχαία τοποθέτηση σε κάθε επίπεδη στρώση. Τέλος, ο όρος τριχίτες (*whiskers*) χρησιμοποιείται για την περιγραφή λεπτών ινών μονοκρυσταλλικών υλικών κεραμικού τύπου.

Για τη σύγκριση διαφορετικών ινών συχνά χρησιμοποιούνται τα μεγέθη του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής τους. Συνηθίζεται να πραγματοποιείται αναγωγή των τιμών αυτών των ιδιοτήτων ως προς την πυκνότητα των ινών και τα μεγέθη που προκύπτουν καλούνται ειδική αντοχή (*Specific Strength*) και ειδικό μέτρο ελαστικότητας (*Specific Modulus*).

Τα σύνθετα ινώδη υλικά στην πλειονότητα τους δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως ιστροπικά, λόγω του ότι οι μηχανικές ιδιότητες τους καθορίζονται από τον προσανατολισμό των ινών. Το ποσοστό των ινών της ενίσχυσης ενός σύνθετου υλικού δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 80% v/v του τελικού προϊόντος γιατί τότε ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα αντοχής της κατασκευής. Πολλές φορές χρησιμοποιούμε ως ενίσχυση όχι μόνο ένα είδος ινών, αλλά συνδυασμό δύο ή περισσότερων, ώστε να επιτυγχάνονται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Αυτού του είδους τα προϊόντα ονομάζονται υβριδικά σύνθετα (*Hybrid composites*).

Έχουν εμφανιστεί περιπτώσεις στις οποίες οι ίνες της ενίσχυσης αστοχούν ακόμα και όταν ασκείται φορτίο μικρότερο από το μέγιστο επιτρεπόμενο, όπως αυτό καθορίζεται από την αντοχή τους. Το φαινόμενο αυτό μπορεί εμφανιστεί λόγω της τοπικής ανομοιογένειας του υλικού σε όλο το μήκος των ινών, η οποία προέρχεται από ατέλειες που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί κατά τα στάδια παρασκευής τους. Ένας βασικός τρόπος αντιμετώπισης της αστοχίας των ινών είναι η εξέταση του φαινομένου αρχικά σε μια μεμονωμένη ίνα ώστε να κατανοηθεί επαρκώς το φαινόμενο.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που δημιουργείται από την καταστροφή των ινών είναι το γεγονός ότι αναπτύσσεται συσσώρευση τάσεων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αλληπάλληλη αστοχία των υπολοίπων ινών και της μήτρας [7].

Για τον εντοπισμό μικρορωγμών έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ελέγχου, καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές, οι οποίες συχνά συνδυάζονται για να ληφθούν εγκυροτέρα αποτελέσματα.

Στο αρχικό στάδιο της σχεδίασης ενός σύνθετου υλικού συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται αναλυτικές αριθμητικές μέθοδοι, για να προβλεφθούν, μέσω στατικών μαθηματικών μοντέλων, πιθανές αστοχίες στο σύνθετο. Οι αναλύσεις αυτές

συνήθως χρησιμοποιούνται για μια αρχική εκτίμηση. Παρά την αυξημένη υπολογιστική ισχύ που είναι διαθέσιμη σήμερα δεν μπορεί να γίνει ακριβής πρόβλεψη, λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών που υπεισέρχονται στο κάθε πρόβλημα σε πραγματικές συνθήκες.

Μήκος ίνας

Βασικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων ινωδών υλικών αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο το εφαρμοζόμενο φορτίο που ασκείται στο υλικό μεταφέρεται από την μητρική φάση στην ενίσχυση (ίνες). Έχει καθοριστεί ένα συγκεκριμένο κρίσιμο μήκος ίνας ώστε να επιτυγχάνεται η ουσιαστική αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας του συνθέτου υλικού [2, 8]. Ενδεικτικός τύπος υπολογισμού του κρίσιμου μήκους ίνας σε συνάρτηση αντοχής διαμέτρου και αντοχής δεσμού ίνας - μήτρας είναι ο παρακάτω:

$$L_c = (\sigma_f \times d) / (2 \tau_c) \quad (1.3)$$

Οπού L_c είναι το κρίσιμο μήκος της ίνας, d η διάμετρος της, σ_f η μέγιστη εφελκυστική τάση και τ_c η διατμητική τάση ή η αντοχή δεσμού ίνας - μήτρας (χρησιμοποιείται το μικρότερο μέγεθος από τα δύο).

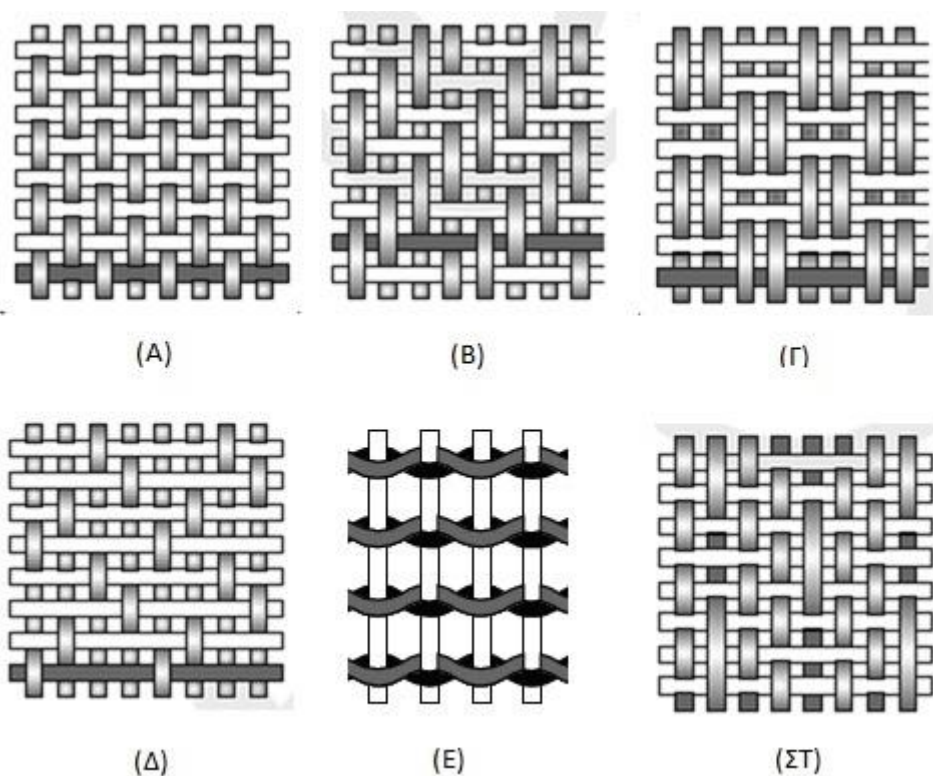
Οι ίνες για τις οποίες ισχύει ότι $L \gg L_c$ χαρακτηρίζονται ως συνεχείς διαφορετικά θεωρούνται ασυνεχείς ή κοντές ίνες.

Για να μπορέσουν να αξιοποιηθούν οι ίνες σε σύνθετα υλικά έχουν δημιουργηθεί τύποι υφασμάτων σε μεγάλη ποικιλία. Παρ' όλα αυτά έχουν επικρατήσει [2, 8, 9] οι παρακάτω πέντε βασικοί τύποι πλέξεων (σχήμα 1.1) που συναντώνται πιο συχνά:

- 1) **Απλή πλέξη (Plain Weave)**. Η πλέξη αυτή είναι η πιο συνηθισμένη και χαρακτηρίζεται από την σταθερότητα της. Οι διαμήκεις και οι εγκάρσιοι θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και τοποθετούνται εναλλάξ η μια ομάδα πάνω από την άλλη (Σχήμα 1.1 Α).
- 2) **Η διαγώνια πλέξη (Twill)**. Βασικό χαρακτηριστικό της είναι η εμφάνιση διαγώνιων γραμμών στις οποίες οφείλεται και η ονομασία (Σχήμα 1.1 Β). Σε

σχέση με την προηγούμενη πλέξη έχουμε μεγαλύτερη πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας.

- 3) Η πλέξη **Satin**. Χρησιμοποιείται στην βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών ενώ χαρακτηριστικό είναι ότι στην μπροστινή επιφάνεια κυριαρχούν οι διαμήκεις θύσανοι ινών (*Wrap*) (Σχήμα 1.1 Γ).
- 4) **Καλαθωτή πλέξη (Basket Weave)**. Αποτελεί μια παραλλαγή της απλής πλέξης κατά την οποία δυο ή περισσότεροι διαμήκεις θύσανοι διασταυρώνονται με τους αντίστοιχους σε αριθμό εγκάρσιους θυσάνους (Σχήμα 1.1 Δ).
- 5) Η πλέξη **Leno**: Βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι περιορίζει στο ελάχιστο την μετατόπιση των θυσάνων (Σχήμα 1.1 Ε, ΣΤ).



Σχήμα 1.1. Απεικόνιση πέντε βασικών τύπων πλέξης που συναντώνται συχνά στα ενισχυτικά υφάσματα που παράγονται βιομηχανικά [8].

Προσανατολισμός ινών

Ο προσανατολισμός των ινών [2] αποτελεί ένα σημαντικότατο παράγοντα που καθορίζει την τελική συμπεριφορά αλλά και τις ιδιότητες ενός ινώδους σύνθετου υλικού, δημιουργώντας τις δύο παρακάτω κατηγορίες υλικών:

- Τα ινώδη σύνθετα στα οποία οι ίνες προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση.
- Τα ινώδη σύνθετα στα οποία οι ίνες προσανατολίζονται σε διάφορες διευθύνσεις, όπως: ίνες σε τυχαία διεύθυνση, πλέξη ύφανσης και ίνες με τρισσορθογωνική ύφανση.

Η επιλογή του προσανατολισμού πρέπει να γίνεται με προσοχή και λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές απαιτήσεις που θέλουμε να έχει το τελικό προϊόν.

Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού

Τα πολυμερή σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών γυαλιού είναι γνωστά και ως *Fiberglass* (*GFRP, Glass fiber - reinforced polymer composites*) και έχουν το γυαλί ως υλικό κατασκευής των ενισχυτικών ινών. Οι ενισχύσεις αυτές συναντώνται είτε σε συνεχή είτε σε ασυνεχή μορφή. Το *Fiberglass* πρωτοεμφανίστηκε το 1940 και αποτελεί ακόμα το πιο διαδεδομένο υλικό στον χώρο των ινωδών σύνθετων υλικών. Οι διάμετροι των ινών συνήθως κυμαίνονται από 3 μέχρι 20 μm .

Οι ίνες γυαλιού έχουν την ίδια μοριακή δομή με αυτή του γυαλιού που συναντάται σε άλλα σχήματα (πλάκες, ράβδοι κλπ.) και θεωρούνται ιστροπικά υλικά. Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιότητες τους εμφανίζουν την ίδια τιμή προς κάθε κατεύθυνση στο χώρο.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ενισχυτικών ινών από γυαλί είναι:

- Διελκύνονται εύκολα από τήγμα γυαλιού σε ίνες υψηλής αντοχής.
- Παράγονται εύκολα και με μικρό οικονομικό κόστος.
- Έχουν υψηλή αντοχή.

- Όταν συζευχθούν με διαφορετικά είδη πλαστικών μπορούμε να έχουμε διαφορετικές ιδιότητες.

Οι πιο γνωστοί τύποι γυαλιού που χρησιμοποιούνται είναι οι E , R , C και S ενώ οι περισσότεροι από τους άλλους που υπάρχουν σχετίζονται με μεμονωμένους κατασκευαστές και πρόκειται για ειδικές περιπτώσεις. Τον συμβολισμό των τύπων του γυαλιού τον λαμβάνουν ανάλογα με τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες τους. Για παράδειγμα ο τύπος E προέρχεται από την λέξη *Electrical*, ο S από την λέξη *Stiffness* ενώ ο C από την λέξη *Chemical* ή *Corrosion* ο οποίος έχει μεγάλη αντοχή σε χημικά προϊόντα και για αυτό χρησιμοποιείται συχνά σε σωληνώσεις σκαφών.

Πιο συχνά χρησιμοποιείται ο τύπος E εξαιτίας των καλών μηχανικών ιδιοτήτων του (μεγάλη εφελκυστική και θλιπτική αντοχή), της εύκολης κατεργασίας του, της αντοχής του σε υγρασία αλλά και σε χτυπήματα, όπως επίσης και της ικανοποιητικής ανθεκτικότητας σε χημικά. Οι ίνες τύπου R και S δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, λόγω του υψηλού οικονομικού κόστους.

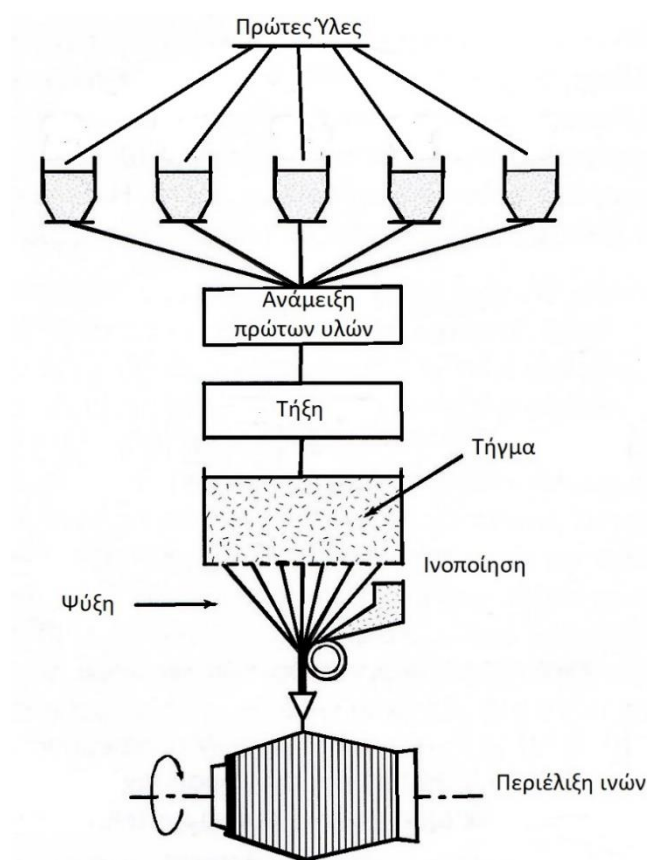
Για να επιτευχθούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες από την ίνα γυαλιού συνηθίζεται να αυξάνεται η περιεκτικότητα πυριτίου σε αυτήν. Ο τύπος R έχει παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά με τον E , με την διαφορά ότι ο R μπορεί να έχει μέχρι και 20% αυξημένη αντοχή σε διάτμηση.

Τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των ινών γυαλιού μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητές του. Τρίψιμο ή εκτριβή της επιφάνειας του σύνθετου, ακόμα και έκθεση των ινών του γυαλιού για μικρό χρονικό διάστημα στην ατμόσφαιρα μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων.

Οι ίνες στην αρχική τους κατάσταση συνήθως περιβάλλονται από ένα υμένιο (μεμβράνη) το οποίο είναι μια λεπτή στρώση υλικού που προσφέρει επιφανειακή προστασία. Συνήθως κατά την παραγωγή του συνθέτου αυτό το στρώμα απομακρύνεται και αντικαθίσταται από έναν παράγοντα σύζευξης ή φινίρισμα.

Η χρήση των ινών γυαλιού είναι δυνατή μέχρι θερμοκρασίες της τάξης των 200 °C, ενώ στην περίπτωση ινών διοξειδίου του πυριτίου προερχόμενο από τήγμα υψηλής καθαρότητας μπορούμε να έχουμε θερμοκρασία λειτουργίας μέχρι 300 °C.

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με διέλαση τήγματος γυαλιού μέσα από κατάλληλη μήτρα με διάτρητο πυθμένα [9]. Αρχικά το τήγμα τοποθετείται σε δεξαμενή όπου τήκεται. Έπειτα τοποθετείται σε δοχεία με διάτρητους πυθμένες (διάμετρος οπών 1-2 mm) όπου με την επίδραση της βαρύτητας και με την βοήθεια ενός εξωλκέα παράγονται ίνες διαμέτρου 1-15 μm . Τέλος, για να αποθηκευτούν τυλίγονται σε κατάλληλο κύλινδρο. Για τη ρύθμιση της διαμέτρου της ίνας ρυθμίζεται η στάθμη του αρχικού τήγματος, η πυκνότητα του ή η διάμετρος των οπών. Ο τρόπος παραγωγής της ίνας γυαλιού απεικονίζεται στο σχήμα 1.2:



Σχήμα 1.2. Απεικόνιση τρόπου παραγωγής ίνας γυαλιού [9].

Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα

Τα πολυμερή σύνθετα υλικά με ενίσχυση άνθρακα (ανθρακονήματα) είναι διαδομένα σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών είναι [2]:

- Οι ίνες έχουν υψηλότερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλότερη ειδική αντοχή σε σχέση με όλα τα συνήθως χρησιμοποιούμενα ινώδη ενισχυτικά υλικά.
- Διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητες τους ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Έχουν μικρή αντοχή σε τοπικά χτυπήματα.

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή ινών άνθρακα είναι το ρεγιόν (*Rayon*), το πολυακρυλονιτρίλιο (*Polyacrylonitrile, PAN*) και η πετρελαϊκή πίσσα. Η διάμετρος των ινών κυμαίνεται από 4 μέχρι 10 μm . Συχνά, κατά το τέλος της παραγωγής των ινών τοποθετείται ειδική προστατευτική επικάλυψη εποξικής ρητίνης που έχει ως σκοπό την καλύτερη συγκολλησιμότητα με τη μήτρα. Οι ίνες αποτελούνται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες γραφίτη, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο παρασκευής τους.

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων με πρώτη ύλη πολυακρυλονιτρίλιο (*PAN*) διακρίνονται τρία βασικά στάδια [1]:

- Οξείδωση υπό τάση των ινών *PAN* σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, σε θερμοκρασία 100 - 200 °C.
- Πυρόλυση υπό τάση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100 - 1500 °C.
- Θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα σε υψηλές θερμοκρασίες 2500 - 3000 °C.

Στον παρακάτω πίνακα 1.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα υψηλής αντοχής που έχουν παραχθεί από τα δύο πρώτα στάδια που προαναφέρθηκαν και ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας οι οποίες έχουν παραχθεί με εφαρμογή των τριών παραπάνω σταδίων.

Πίνακας 1.1 Μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών άνθρακα [5].

	Ίνες υψηλής αντοχής	Ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας
Μέτρο ελαστικότητας (<i>GPa</i>)	180 - 230	350 - 420
Αντοχή σε εφελκυσμό (<i>MPa</i>)	2500 - 3400	1900 - 2300
Περιεκτικότητα σε C (%wt)	95 - 98	99
Πυκνότητα (<i>g/cm³</i>)	1.8	1.9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (<i>°C</i>)	2000	2500

Το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη σύμφωνα με εκτιμήσεις είναι 10 φορές μεγαλύτερο από αυτό των ινών γυαλιού, κάτι που δικαιολογεί την περιορισμένη χρήση τους.

Η ονομασία των ινών από άνθρακα ορίζεται αρχικά από την σχεδίαση του νήματος, έπειτα από τον τύπο, και τέλος από τον αριθμό των νημάτων μέσα στο πολυνήμα (θύσανος), εκφρασμένο σε χιλιάδες (π.χ. *HR-12k*).

Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου

Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, ενώ έχουν επίσης υψηλές τιμές λόγου βάρους προς αντοχή, σε σχέση με τα μέταλλα. Η χημική ονομασία του πολυμερούς κατασκευής των ινών είναι παρα-φαινυλο-τερεφθαλαμίδιο. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από ίνες αυτού του είδους, όμως οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι το *Kevlar* και το *Nomex*, ενώ ακόμα και αυτές έχουν διαβαθμίσεις γεγονός που συνεπάγεται διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Οι ίνες αυτές έχουν εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας κατά τη διαμήκη κατεύθυνση, τα οποία είναι υψηλότερα από άλλα υλικά με ενίσχυση ινών, όμως έχουν μικρή αντοχή στη θλίψη [2].

Τα βασικά χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν την εξαιρετικά καλή δυσθραυστότητα, την αντοχή σε κρούση, την αντοχή σε ερπυσμό και σε κόπωση. Οι

Θερμοκρασίες στις οποίες οι μηχανικές ιδιότητες παραμένουν ίδιες είναι από -200 °C έως 200 °C. Το γενικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι ίνες αυτές διαβρέχονται από την μήτρα πιο δύσκολα από άλλες αντίστοιχες ενισχύσεις. Χαρακτηριστικές ιδιότητες [5] ινών *Kevlar* δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών *Kevlar* [5].

	<i>Kevlar 29</i>	<i>Kevlar 49</i>
Μέτρο ελαστικότητας (<i>GPa</i>)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (<i>MPa</i>)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (<i>g/cm³</i>)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200

Άλλα υλικά ινώδους ενίσχυσης

Υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται πιο σπάνια σε ενισχυτικές ίνες περιλαμβάνουν το βόριο, το καρβίδιο του πυριτίου και το οξείδιο του αλουμίνιου. Οι λόγοι που οδηγούν στην μειωμένη παρουσία τους είναι κυρίως οικονομικοί. Παρ' όλα αυτά έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται νέα υλικά προς χρήση για ινώδη σύνθετα τα οποία έχουν καλές προοπτικές μελλοντικής ανάπτυξης.

Το μέλλον των ινωδών ενισχύσεων

Παρά τις πολύ καλές ιδιότητες που παρέχουν τα σύνθετα ινώδη υλικά ένα βασικό μειονέκτημα που έχουν είναι το υψηλό οικονομικό κόστος ανακύκλωσης αυτών μετά το πέρας της εργασίας τους. Ο κύριος λόγος είναι η ίδια η φύση των συνθέτων υλικών δηλαδή ότι αποτελούνται από περισσότερα από ένα διαφορετικά υλικά.

Από την μια μεριά η χρήση μήτρας από πλαστικό είναι πολύ δαπανηρή για την κατασκευή της, ενώ από την άλλη η χρήση πολυμερούς αν και δείχνει πιο ελκυστική ενέχει μεγαλύτερους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αλλά και το γεγονός ότι αρκετά σκάφη έχουν αρχίσει να φτάνουν στο τέλος της ζωής τους, έχουν αρχίσει να πραγματοποιούνται έρευνες για νέες λύσεις στα παραπάνω προβλήματα [3, 10].

Η πλειονότητα των κατασκευών στην ναυπηγική χρησιμοποιεί θερμοσκληρυνόμενες μήτρες ενώ σχετικά πρόσφατα, έχουν εμφανιστεί βιοβασιζόμενες (*bio-based*) μήτρες, οι οποίες αν και έχουν περιορισμένη χρήση στον χώρο εμφανίζουν καλές προοπτικές ανάπτυξης. Τα πλεονεκτήματα μιας βιοβασιζόμενης μήτρας αφορούν κυρίως την ανθρώπινη υγεία αλλά και την περιβαλλοντική ρύπανση, μέσω της μείωσης των τοξικών αέριων που εκλύονται αλλά και των προϊόντων που απομένουν. Επιπλέον έχουν κατασκευαστεί βιοβασιζόμενες ινώδεις ενισχύσεις, οι οποίες όμως ακόμα δεν έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον των κατασκευαστών εξαιτίας των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων που παρέχουν έναντι των υφιστάμενων. Οι ίνες από γυαλί καλύπτουν το 89% των ενισχύσεων που χρησιμοποιούνται σε ινώδη σύνθετα υλικά παγκοσμίως, ενώ μόλις 10% είναι αυτές από φυσικές ίνες [10].

Η έννοια “πράσινα σύνθετα υλικά” αναφέρεται σε εκείνα στα οποία τουλάχιστον η μήτρα προέρχεται από βιοβασιζόμενα υλικά ή από ανακύκλωση.

Όσον αφορά τις ίνες, στην προσπάθεια να βρεθούν οικολογικές εναλλακτικές, έχουν χρησιμοποιηθεί ίνες από λινάρι (*Flax*), κάνναβη (*Hemp*) και βαμβάκι (*Cotton*), με τις ιδιότητες αυτών όμως να μην είναι αντίστοιχες των άλλων διαδεδομένων υλικών, δίχως όμως το γεγονός αυτό να τις καθιστά μη αξιοποιήσιμες επιλογές.

Το βασικότερο πλεονέκτημα των βιοβασιζόμενων ινών δεν πηγάζει μόνο από το γεγονός ότι για την παραγωγή τους η εκπομπή αέριων είναι μικρότερη αλλά και από το ότι κατά την δημιουργία τους εγκλωβίζουν ρύπους, με αποτέλεσμα να είναι ακόμα περισσότερο φιλικές για το περιβάλλον [10]. Στον πίνακα 1.3 που ακολουθεί, δίνονται ενδεικτικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων διάφορων ινών.

Πίνακας 1.3 Μηχανικές ιδιότητες βιοβασισμένων ενισχυτικών ινών [10].

Τύπος ίνας	Πυκνότητα (g/cm^3)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	<i>Young's modulus</i> (GPa)	Παραμόρφωση στη θραύση (%)
Γιούτα	1.30 - 1.45	342 - 672	43.8	1.7 - 1.8
Λινάρι	1.50	300 - 900	24.0	2.7 - 3.2
Κάναβη	-	142 - 819	4.8 - 34.4	1.5 - 4.5
Βασάλτης	2.80	4800	90.0	3.1
<i>Sisal</i>	1.45	444 - 552	9.4 - 22.0	2.0 - 2.5
Γυαλί τύπου E	2.54	3200	70.0	4.0
Αραμίδιο	1.44	2400 - 3600	60.0 - 120.0	2.2 - 4.4
Άνθρακας	1.81	5490	294.0	1.9

Μια πρόταση που έχει αρχίσει να υιοθετείται από την διεθνή κοινότητα είναι ο συνδυασμός κοινών ενισχυτικών ινών με νέες βιοβασισμένες, ώστε να έχουμε προϊόντα με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες αλλά και έως και 40% μείωση του συνολικού βάρους του σύνθετου. Παρ' όλα αυτά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε περίπτωση πως τα νέα αυτά υλικά ενισχυτικών ινών συχνά δεν έχουν τις ίδιες αντοχές σε περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και σε επαφή με διάφορες χημικές ουσίες.

Έχει παρατηρηθεί ότι τα ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία έχουν ίνες με μεγάλο μήκος εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή από αυτές με μικρότερο αν και οι τελευταίες συχνά αποτελούν την πιο οικονομική λύση και για αυτό συχνά χρησιμοποιούνται σε απλές εφαρμογές. Στον παρακάτω πίνακα 1.4 αναγράφονται ενδεικτικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες ενισχύσεων από υβριδικά υφάσματα συνδυασμένων με βιοβασισμένες ίνες.

Πίνακας 1.4 Μηχανικές ιδιότητες υβριδικών υλικών με κοινές και βιοβασισζόμενες ενισχυτικές ίνες [10].

Πολύστρωτα	Ιδιότητες σε εφελκυσμό					Ιδιότητες σε κάμψη		
	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	G (MPa)	ν	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
Λινάρι	49.3	0.93	4854	2001	0.21	118.3	1.66	6930
Βασάλτης	160.1	1.47	11042	5368	0.03	265.0	1.84	14481
Λινάρι/Βασάλτης	86.5	1.12	8151	3879	0.13	144.8	1.69	8275

Από τα δεδομένα του πίνακα 1.4 προκύπτει πως ο συνδυασμός των δύο υλικών δίνει ένα νέο υλικό με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από αυτές του απλού γυαλιού.

Μια ακόμα καινοτομία που έχει πραγματοποιηθεί πρόσφατα, είναι η δημιουργία υφασμάτων χωρίς πτυχώσεις με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση 20 με 30 % της αντοχής σε εφελκυσμό (*tensile strength*) [3]. Το μειονέκτημα αυτών είναι το υψηλό κόστος για μεγάλες κατασκευές, ενώ έχουν παρατηρηθεί προβλήματα εξαιτίας του γεγονότος πως χρησιμοποιούνται κλωστές για να μπορέσουν να παραμείνουν στον προσανατολισμό τους οι ίνες του υφάσματος.

1.4 Πυρήνες

Τα σύνθετα που χρησιμοποιούνται σε πολλές ναυπηγικές κατασκευές πολλές φορές περιέχουν πυρήνα, δηλαδή υλικό το οποίο παρεμβάλλεται ανάμεσα στις στρώσεις των ενισχύσεων ώστε να επιτευχθούν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα σύνθετα υλικά με τα χαρακτηριστικά αυτά είναι γνωστά ως υλικά τύπου *Sandwich*.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πυρήνες σε ναυπηγικά σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Τα αφρώδη υλικά.
- Το ξύλο.
- Τα κυψελοειδή υλικά.

1.4.1 Αφρώδη υλικά ως πυρήνας

Τα βασικά αφρώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική είναι:

- **PVC (Poly Vinyl Chloride).** Διαθέτει εξαιρετική αντοχή στην απορρόφηση νερού και σε αρκετά χημικά προϊόντα όπως είναι το στυρένιο που εντοπίζεται στις πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες. Υπάρχουν δύο τύποι PVC: ο τύπος διασυνδεδεμένων αλυσίδων (*Crosslinked*) και ο τύπος μη συνδεδεμένων (*Uncrossed*), με τον τελευταίο να ονομάζεται συνήθως ως γραμμικό πολυβινυλοχλωρίδιο (*Linear PVC*). Το *Linear PVC* είναι εύκαμπτο, αλλά έχει χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από το *Crosslinked PVC* το οποίο όμως είναι περισσότερο εύθραυστο.
- **PU (Polyurethane).** Χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις που θέλουμε ελαφριά κατασκευή όπως είναι περιπτώσεις ενισχυτικών. Οι μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς αυτού δεν είναι υψηλές, ενώ συχνά παρατηρούνται σπασίματα καθώς και αποκόλληση ανάμεσα στον πυρήνα και στο περίβλημα.
- **PMI (Polymethacrylimide).** Χρησιμοποιείται εξαιτίας της υψηλότερης αντοχής σε δυσκαμψία που διαθέτει. Επίσης, έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες.
- **SAN (Styrene Acrylonitrile).** Διαθέτει υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του είναι παρόμοια με αυτά του *Crosslink PVC* με μεγαλύτερη όμως δυνατότητα παραμόρφωσης και μεγαλύτερη σκληρότητα.

1.4.2 Ξύλο ως πυρήνας

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ξύλου ως πυρήνα σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό από την γεωμετρία της κατασκευής. Οι δύο βασικές τεχνικές που εφαρμόζονται κατά τη δημιουργία *Sandwich* με πυρήνα από ξύλο σχετίζονται με τον προσανατολισμό των ινών του ξύλου (*Grains*) σε σχέση με τις ενισχύσεις του υπόλοιπου *Sandwich*.

Σε περίπτωση που οι ίνες του ξύλου έχουν διεύθυνση κάθετη στο περίβλημα του *Sandwich*, τότε η συμπεριφορά του ξύλου είναι παρόμοια με αυτή των αφρώδων ή των κυψελοειδών υλικών. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν οι ίνες είναι τοποθετημένες

παράλληλα με το *Sandwich* τότε επιτυγχάνεται αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής σε διάτμηση.

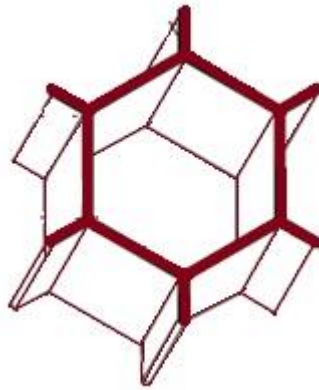
Τα κυριότερα είδη ξύλου από τα οποία κατασκευάζονται σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές κατασκευές είναι:

- **Balsa.** Διαθέτει υψηλή αντοχή σε θλίψη και διάτμηση, ενώ έχει υψηλή σταθερότητα όταν θερμαίνεται. Το ξύλο αυτό μπορεί να βρεθεί σε μεγάλη ποικιλία όσο αφορά την πυκνότητα και το πάχος.
- **Red cedar:** Συνηθίζεται να αναφέρεται και ως *Strip Planking*.

1.4.3 Κυψελοειδή υλικά ως πυρήνας

Τα υλικά τύπου *Sandwich* που χρησιμοποιούν πυρήνες μορφής κυψέλης (*Honeycomb*) έχουν ευρεία χρήση στην ναυπηγική, σε μικρά σκάφη, εξαιτίας του χαμηλού βάρους, των υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και τη δυνατότητα απορρόφησης συγκριτικά μεγάλων ποσών ενέργειας. Έχει επικρατήσει οι πυρήνες αυτοί να κατασκευάζονται από διάφορα ελαστικά υλικά, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευάζονται από αλουμίνιο. Στη ναυπηγική, συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους θερμοπλαστικά υλικά όπως είναι το πολυαιθυλένιο, πολυκαρβονικά πολυμερή και πολυπροπυλένιο. Ως βασικά τους χαρακτηριστικά έχουν τη χαμηλή δυσκαμψία και την δυσκολία δημιουργίας δεσμού με την ενίσχυση [1].

Η γεωμετρία της κυψέλης μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τα κύρια χαρακτηριστικά, όπως είναι το συνολικό πάχος αυτής ή οι διαστάσεις και η γεωμετρία κάθε ξεχωριστού κελιού. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων το κάθε κελί είναι πανομοιότυπο με όλα τα υπόλοιπα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφία. Η γεωμετρία του κάθε κελιού μπορεί να καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την συνολική απόδοση του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 1.3. Σχηματική παράσταση πυρήνα κυψέλης (Honeycomb).

Οι κυψέλες χρησιμοποιούνται συνήθως με προεμποτισμένες ενισχύσεις (*Pre-Preg*) ενώ είναι αναγκαίο να προθερμαθούν πριν από την έναρξη του πολυμερισμού για να επιτευχθεί μείωση της ποσότητας των αερίων που εκλύονται.

Σημειώνεται ότι ένα είδος κυψελοειδούς ενίσχυσης, κατασκευασμένη από το πολυμερές *Meta-Aramid*, αποτελείται από ένα φύλλο πολυμερούς εμποτισμένο με ρητίνη, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών [11].

1.5 Πλεονεκτήματα συνθέτων υλικών στην ναυπηγική

Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την χρήση σύνθετων υλικών στον κλάδο της ναυπηγικής ποικίλουν, μπορούν όμως να συνοψιστούν σε δύο βασικά στοιχεία [2, 12]:

- Το μικρό βάρος σε αντιστοιχία με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αλλά παραδοσιακά υλικά.
- Την αντοχή στην διάβρωση.

Τα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ενίσχυση με ίνες δίνουν την δυνατότητα επιλεκτικής ενίσχυσης μιας περιοχής, κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη βελτιστοποίηση σε βάρος αλλά και σε οικονομικό κόστος των υλικών της κατασκευής. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά έχουν δώσει την δυνατότητα κατασκευής

σκαφών χαμηλότερου βάρους αλλά και με ανώτερα μηχανικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά, για την σωστή επιλογή συνθέτου υλικού αλλά και τη σωστή τοποθέτηση του σε καίριες περιοχές είναι αναγκαία η ύπαρξη υψηλού επιπέδου γνώσης όσον αφορά τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά δεν διαβρώνονται από το θαλασσινό νερό και για αυτό καθίστανται ως μια εξαιρετική επιλογή για ναυπηγικές κατασκευές ακόμα και αν βρίσκονται για μεγάλο χρονικό διάστημα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όπως τα μέταλλα έτσι και τα σύνθετα δεν προσφέρουν από μόνα τους προστασία από θαλάσσιους οργανισμούς οι οποίοι επικάθονται στις επιφάνειες αυτών. Επομένως είναι αναγκαία η χρήση χρωμάτων που προστατεύουν από τη βιοσυσσώρευση, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα πλοία που κατασκευάζονται από μέταλλο.

Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που καθιστούν τα σύνθετα υλικά ως μια πολύ καλή επιλογή για κατασκευές είναι η ευελιξία που παρέχεται. Πολύπλοκες συνθέτες κατασκευές μπορούν να δημιουργηθούν ως ένα ενιαίο κομμάτι, δίνοντας έτσι στα σύνθετα υλικά ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι παραδοσιακών υλικών όπως είναι τα μέταλλα.

Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά, μερικά ακόμα πλεονεκτήματα των ινωδών σύνθετων υλικών [2, 12]:

- Οι καλές θερμικές ιδιότητες.
- Η αντοχή στην κόπωση (ειδικά εκείνα με ίνες άνθρακα).
- Ηλεκτρικές μονωτικές ιδιότητες.
- Απουσία ραφών από την κατασκευή που οδηγεί σε μείωση συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και σε μείωση του κόστους κατασκευής.
- Πιο εύκολη επισκευασιμότητα σε σχέση με άλλα παραδοσιακά υλικά.
- Μικρή ανάγκη για συντήρηση και σχετικά μεγάλο προσδόκιμο ζωής.
- Αντοχή στο θαλάσσιο περιβάλλον.
- Καλή αντοχή σε χημικά.
- Δυνατότητα για χρήση περίτεχνων καλουπιών.
- Καλή αναλογία τιμής προς ποιότητα.

- Δυνατότητα χρήσης καλουπιού με χρώμα.

1.6 Μειονεκτήματα συνθέτων υλικών στην ναυπηγική

Τα κυριότερα μειονεκτήματα από την χρήση σύνθετων υλικών στη ναυπηγική αφορούν [2]:

- Την έλλειψη ολκιμότητας, δηλαδή το γεγονός ότι τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή αλλά και το γεγονός ότι η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης είναι γραμμική με αυτό να σημαίνει ότι το υλικό δεν δείχνει έντονα προειδοποιητικά σημάδια πριν αστοχήσει.
- Την περιορισμένη δυνατότητα επιθεώρησής τους, κυρίως λόγω των μη σταθερών συνθήκων κατασκευής με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη ελέγχου ολόκληρης της επιφάνειας και όχι μεμονωμένων σημείων. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η επιθεώρηση σύνθετων υλικών τελικά να είναι μια πιο χρονοβόρα διαδικασία από ότι αυτή των παραδοσιακών υλικών.

Μερικά ακόμα μειονεκτήματα που παρατηρούνται είναι η εμφάνιση του φαινομένου του ερπυσμού σε περιπτώσεις υψηλής και συνεχούς φόρτισης, φαινόμενο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση της γάστρας ώστε να αποφεύγονται τέτοιου είδους δυνάμεις. Επιπλέον, η αντοχή τους στην τριβή είναι σχετικά περιορισμένη.

Τα σύνθετα υλικά, στην περίπτωση που δεν ληφθεί κατάλληλη μέριμνα, συχνά είναι εύφλεκτα δημιουργώντας μεγάλο κίνδυνο εξάπλωσης της φωτιάς σε περίπτωση πυρκαγιάς. Γι' αυτό συνηθίζεται για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου να χρησιμοποιούνται πρόσθετα που περιορίζουν τη διάδοση της φωτιάς, ή ειδικές για το σκοπό αυτό ρητίνες (φαινολικές ή άλλες κατάλληλες ρητίνες).

Ένα ακόμα μειονέκτημα των σύνθετων υλικών που προορίζονται για ναυπηγικές κατασκευές, είναι η ανάγκη για ειδική μελέτη στην περίπτωση που χρειάζεται τοποθέτηση κάποιου μεμονωμένου εξαρτήματος, καθώς επίσης και των συνθήκων που θα κατασκευαστεί το σύνθετο υλικό, δεδομένου ότι οι

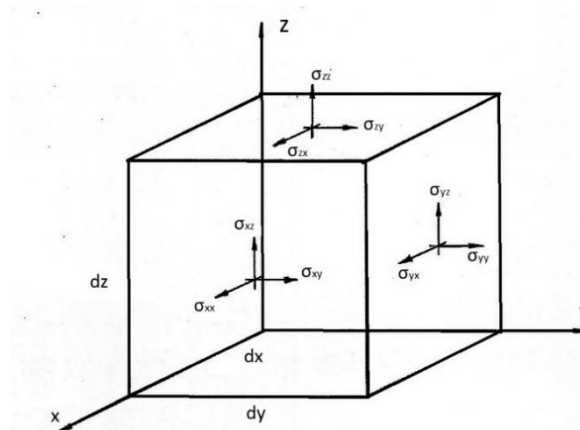
περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα ανέγερσης και την ποιότητα της κατασκευής.

Κεφάλαιο 2.

2.1 Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων συνθέτων υλικών

Ως **πολύστρωτο** (*Laminate*) ορίζεται το σύνθετο το οποίο αποτελείται από τουλάχιστον δύο **στρώσεις** (*Layers*) υλικού οι οποίες δρουν σαν ένα ενιαίο υλικό. Ως λεπτά πολύστρωτα ορίζονται αυτά των οποίων οι επιμέρους στρώσεις έχουν πάχος μικρότερο των 100 μm . Τα λεπτά πολύστρωτα είναι γνωστά για τις υψηλές μηχανικές ιδιότητες τους με αυτό να αποδίδεται στην ικανότητα τους να περιορίζουν τον αντίκτυπο των αστοχιών της μήτρας. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει υψηλή αντοχή, ανώτερη αντοχή σε συμπίεση αλλά και σε κόπωση, σε σχέση με αλλά πολύστρωτα. Παρόλα αυτά, μειονέκτημα αυτών αποτελεί η δημιουργία τοπικών συγκεντρώσεων υψηλών τάσεων [13] .

Για να οριστούν οι βασικές εξισώσεις ελαστικότητας ανισοτροπικών υλικών, αρχικά θεωρείται ένα συμπαγές ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που αντιστοιχεί σε ένα σημείο του υλικού με διαστάσεις dx , dy και dz . Το ορθογώνιο αυτό μαζί με καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ονομάζεται στοιχείο ελέγχου και απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1. Απεικόνιση στοιχείου ελέγχου που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών των μεταβλητών βασικών εξισώσεων ελαστικότητας ανισοτροπικών υλικών [1].

Σε κάθε μια από τις εξωτερικές πλευρές του σχήματος ορίζεται ορθή τάση σ_{ii} ($i = x, y, z$) κάθετη στο επίπεδο της πλευράς και δυο διατμητικές τάσεις σ_{ij} ($i, j = x, y, z$ με $i \neq j$) παράλληλες ως προς το επίπεδο της πλευράς. Το πρόσημο της κάθε συνιστώσας ορίζεται από τον αντίστοιχο καρτεσιανό άξονα που έχει οριστεί. Οι ορθές παραμορφώσεις (επιμηκύνσεις) συμβολίζονται ως ε_{ii} (με $i = x, y, z$) και οι διατμητικές παραμορφώσεις με ε_{ij} (με $i, j = x, y, z$, όπου $i \neq j$). Οι μετατοπίσεις συμβολίζονται με u_i ($i = x, y, z$) ενώ τα πρόσημα τους ορίζονται και αυτά με βάση το καρτεσιανό σύστημα αξόνων.

2.1.1 Εξισώσεις ισορροπίας

Για το στοιχείο ελέγχου του σχήματος 2.1, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση ισορροπίας, με $i, j = x, y, z$, όπου $i \neq j$ [1]:

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial j} = \rho \ddot{u}_j + d \dot{u}_i \quad (2.1)$$

Ως ρ ορίζεται η πυκνότητα και ως d ο συντελεστής απόσβεσης του υλικού, \dot{u}_j και \ddot{u}_i είναι η πρώτη και η δεύτερη χρονική παράγωγος, αντίστοιχα, της μετατόπισης.

2.1.2 Σχέσεις παραμορφώσεων - μετατοπίσεων

Στην περίπτωση που δεν έχει οριστεί περιορισμός στο μέγεθος των μετατοπίσεων, οι παραμορφώσεις μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω σχέση 2.2, συνάρτηση των μετατοπίσεων [1].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji} + u_{ki}u_{kj}) \quad (2.2)$$

Εκτός από τις παραμορφώσεις που προκύπτουν από έκταση και θλίψη, οι τυχούσες στρεπτικές μετατοπίσεις ενός ευθύγραμμου τμήματος του υλικού πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη της παραμόρφωσης. Ο τανυστής των στροφών μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση 2.3:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} - u_{ji}) \quad (2.3)$$

2.1.3 Εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων

Συνήθως θεωρείται ότι το πεδίο των μετατοπίσεων είναι μονοσήμαντο και συνεχές. Για να εξασφαλιστεί αυτό, χρησιμοποιείται η εξίσωση συμβιβαστού η οποία περιέχει μόνο τους όρους παραμορφώσεων. Στην περίπτωση μικρών μετατοπίσεων θεωρείται ότι οι εξισώσεις συμβιβαστού δίνονται από την ακόλουθη σχέση [1]:

$$\varepsilon_{ij,kl} + \varepsilon_{kl,ij} - \varepsilon_{ik,jl} - \varepsilon_{jl,ik} = 0 \quad (2.4)$$

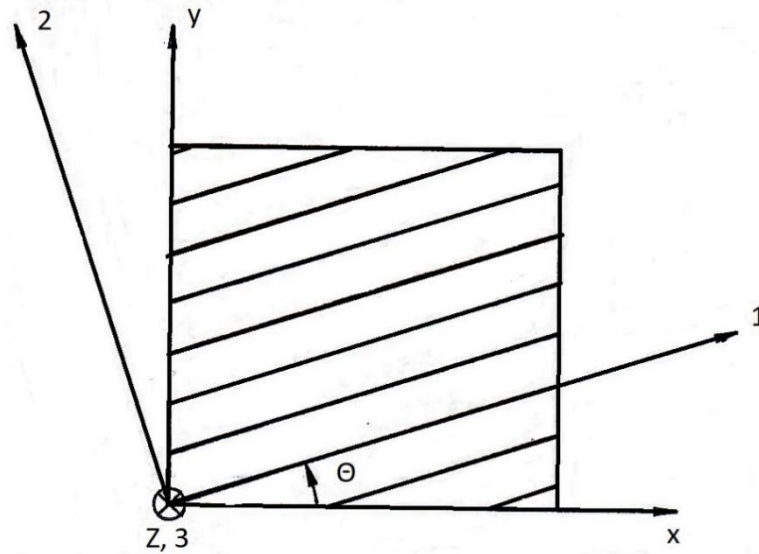
2.1.4 Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης

Οι εξισώσεις τάσης-παραμόρφωσης είναι οι μόνες που διαφέρουν ανάμεσα στα ανισοτροπικά και ιστροπικά υλικά. Για τον εύκολο χειρισμό αυτών των εξισώσεων υιοθετείται ο ακόλουθος συμβολισμός:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{11}, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{11} \\ \sigma_2 &= \sigma_{22}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{22} \\ \sigma_3 &= \sigma_{33}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{33} \\ \sigma_4 &= \sigma_{23} = \tau_{23}, \quad \varepsilon_4 = 2\varepsilon_{23} = \gamma_{23} \\ \sigma_5 &= \sigma_{31} = \tau_{31}, \quad \varepsilon_5 = 2\varepsilon_{31} = \gamma_{31} \\ \sigma_6 &= \sigma_{12} = \tau_{12}, \quad \varepsilon_6 = 2\varepsilon_{12} = \gamma_{12} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Επιπρόσθετα ισχύουν και οι παρακάτω σχέσεις [1], στην περίπτωση που οι κύριοι άξονες του υλικού 1, 2 και 3 συμπίπτουν με αυτούς του πολύστρωτου.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_{xx} = \sigma_x, \quad \varepsilon_{11} = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_x \\ \sigma_{22} &= \sigma_{yy} = \sigma_y, \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_y \\ \sigma_{33} &= \sigma_{zz} = \sigma_z, \quad \varepsilon_{33} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_z \\ \sigma_{23} &= \sigma_{yz}, \quad \varepsilon_{23} = \varepsilon_{yz} \\ \sigma_{31} &= \sigma_{zx}, \quad \varepsilon_{31} = \varepsilon_{zx} \\ \sigma_{12} &= \sigma_{xy}, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{xy} \end{aligned} \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.2. Απεικόνιση κύριων αξόνων του υλικού (1, 2, 3) σε σχέση με αυτούς του πολύστρωτου (x, y, z), [1].

Τα ινώδη σύνθετα υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως γραμμικά ελαστικά δεδομένου ότι ακολουθούν βάση της συμπεριφοράς τους τον γενικευμένο νόμο του *Hooke*. Επομένως ακολουθώντας τον συμβολισμό με συστολή των δεικτών θα έχουμε ότι οι εξισώσεις αντιστοιχούν στην μορφή:

$$\sigma_i = Q_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (2.7)$$

Ως Q περιγράφεται ο πίνακας (*matrix*) δυσκαμψίας.

Η εξίσωση αυτή έχει την παρακάτω γενική μορφή [1], όταν θα χρησιμοποιείται στα πλαίσια της γραμμικής ελαστικότητας:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{14} & Q_{24} & Q_{34} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{15} & Q_{25} & Q_{35} & Q_{45} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{36} & Q_{46} & Q_{56} & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Η παραπάνω σχέση αναφέρεται μόνο σε ανισοτροπικά υλικά με δεδομένο ότι δεν υπάρχει κανένα επίπεδο συμμετρίας ιδιοτήτων. Οι $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ και $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ εκφράζουν τις ορθές τάσεις και παραμορφώσεις αντίστοιχα, ενώ οι $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$ και $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ εκφράζουν τις διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις αντίστοιχα. Στην

περίπτωση που υπάρχει επίπεδο συμμετρίας των ιδιοτήτων του υλικού το οποίο εκφράζει και την στρώση των πολύστρωτων ινωδών συνθέτων υλικών, τα οποία έχουν ένα επίπεδο ελαστικής συμμετρίας, η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή που φαίνεται στην 2.7. Η σχέση αυτή ισχύει για κάθε ξεχωριστή στρώση πολύστρωτου ακόμη και αν οι ίνες δεν είναι παράλληλα ευθυγραμμισμένες με τα άκρα του πολύστρωτου:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & Q_{26} \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & Q_{36} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & Q_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{45} & Q_{55} & 0 \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{36} & 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Στην περίπτωση ορθοτροπικών υλικών υπάρχουν δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας, όσο αφορά τις ιδιότητες του υλικού, με αυτό να συνεπάγεται την ύπαρξη συμμετρίας και ως προς ένα τρίτο επίπεδο, το οποίο είναι κάθετο σε αυτά. Επομένως η παραπάνω σχέση 2.6, λαμβάνοντας υπ' όψη αυτά τα επίπεδα συμμετρίας γίνεται:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Στην περίπτωση που σε κάθε σημείο του υλικού έχουμε νέο επίπεδο στο οποίο οι ιδιότητες αυτού είναι ίσες προς κάθε κατεύθυνση τότε αυτό το υλικό χαρακτηρίζεται ως εγκάρσια ιστροπικό (*Transversely Isotropic*).

2.1.5 Μηχανική συμπεριφορά στρώσης

Οι μηχανικές ελαστικές σταθερές ή αλλιώς τεχνικές σταθερές αποτελούν τις ιδιότητες εκείνες που χαρακτηρίζουν ένα υλικό και οι οποίες στην πλειονότητά τους προσδιορίζονται μέσω πειραματικών δοκιμών.

Λόγω του γεγονότος ότι ο προσδιορισμός των στοιχείων του πίνακα ενδοτικότητας S_{ij} μέσω πειραματικών δοκιμών είναι πολύ πιο εύκολος από ότι αυτών

του πίνακα δυσκαμψίας Q_{ij} συνηθίζεται να λαμβάνονται τις τιμές αυτού από πειράματα.

Τα στοιχεία του πίνακα ενδοτικότητας ορίζονται συνάρτηση των μηχανικών σταθερών με βάση τους παρακάτω τύπους, ενώ προκύπτει πως ο πίνακας αυτός είναι αντίστροφος του πίνακα δυσκαμψίας [1]:

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{E_1}, & S_{12} &= \frac{\nu_{12}}{E_1}, & S_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1}, \\
 S_{21} &= -\frac{\nu_{21}}{E_2}, & S_{22} &= \frac{1}{E_2}, & S_{32} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2}, \\
 S_{13} &= -\frac{\nu_{31}}{E_3}, & S_{23} &= -\frac{\nu_{32}}{E_3}, & S_{33} &= \frac{1}{E_3}, \\
 S_{44} &= \frac{1}{G_{23}}, & S_{55} &= \frac{1}{G_{13}}, & S_{66} &= \frac{1}{G_{12}},
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Όπου E_1 , E_2 και E_3 μέτρα ελαστικότητας του *Young*, ν_{ij} ο λόγος *Poisson* και G_{23} , G_{13} και G_{12} τα μετρά διάτμησης στα επίπεδα 2-3, 1-2 και 3-1 αντίστοιχα.

Ακόμα, λόγω της αντίστροφης σχέσης που ισχύει μεταξύ των δυο πινάκων προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \tag{2.12}$$

Οι παραπάνω σχέσεις χαρακτηρίζουν ορθοτροπικά υλικά, γεγονός που προσδίδει πλεονέκτημα δεδομένου ότι όπως αναφέρθηκε παραπάνω θεωρείται ότι η κάθε στρώση του ινώδους συνθέτου υλικού εμφανίζει ορθοτροπική συμπεριφορά.

Όταν πραγματοποιείται εξέταση του συνολικού πολύστρωτου και όχι μεμονωμένης στρώσης οι παραπάνω σχέσεις 2.11 θα πρέπει να μετασχηματιστούν σε άλλη μορφή.

Ενδεικτικά παρακάτω αναγράφονται οι σχέσεις των στοιχείων του πίνακα δυσκαμψίας συνάρτηση αυτών της ενδοτικότητας:

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{S_{22}S_{33} - S_{23}^2}{S}, & Q_{12} &= \frac{S_{13}S_{23} - S_{12}S_{33}}{S}, \\
 Q_{22} &= \frac{S_{33}S_{11} - S_{13}^2}{S}, & Q_{13} &= \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S},
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$Q_{33} = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{S}, \quad Q_{23} = \frac{S_{12}S_{13} - S_{23}S_{11}}{S},$$

$$Q_{44} = \frac{1}{S_{44}}, \quad Q_{55} = \frac{1}{S_{55}}, \quad Q_{66} = \frac{1}{S_{66}},$$

Ενώ ισχύει ότι:

$$S = S_{11}S_{22}S_{33} - S_{11}S_{23}^2 - S_{22}S_{13}^2 - S_{33}S_{12}^2 + 2S_{12}S_{23}S_{13} \quad (2.14)$$

2.1.6 Περιορισμοί των μηχανικών ελαστικών σταθερών

Για όλα τα υλικά επιβάλλεται να ισχύουν σχέσεις μεταξύ των μηχανικών-ελαστικών σταθερών τους [1], με μια από αυτές για ιστροπικά υλικά να είναι η ακόλουθη 2.15:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{με } -1 < \nu < 0.5 \quad (2.15)$$

Για ορθοτροπικά υλικά επιβάλλεται να ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις 2.16 – 2.19:

$$E_1E_2E_3G_{23}G_{31}G_{12} > 0 \quad (2.16)$$

$$(1 - \nu_{23}\nu_{32}), (1 - \nu_{13}\nu_{31}), (1 - \nu_{12}\nu_{21}) > 0 \quad (2.17)$$

$$\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13} > 0 \quad (2.18)$$

$$|\nu_{ij}| < \sqrt{\frac{E_i}{E_j}} \quad (2.19)$$

Οι παραπάνω σχέσεις συχνά χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί η ορθότητα των πειραματικών μετρήσεων.

2.1.7 Κλασική θεωρία πολύστρωτων

Η **κλασική θεωρία πολύστρωτων** (*Classical lamination theory, CTL*) δίνει την δυνατότητα εξέτασης του τελικού υλικού (σύνθετου) ως ένα σύνολο, δηλαδή ως πολύστρωτο, χάρη στις υποθέσεις των τάσεων και παραμορφώσεων που εμπεριέχει.

Βασική υπόθεση πριν από κάθε μελέτη ενός πολύστρωτου αποτελεί το γεγονός ότι κάθε στρώση θεωρείται ότι είναι πλήρως κολλημένη με όλες τις υπόλοιπες. Θεωρείται επίσης πως οι ενώσεις μεταξύ των στρώσεων είναι απείρως λεπτές και μη παραμορφούμενες σε διάτμηση. Με τις δυο αυτές υποθέσεις εξασφαλίζεται το γεγονός ότι το πολύστρωτο δρα ως ένα σώμα με πολλές επιμέρους ειδικές μηχανικές ιδιότητες. Πρέπει να αναφερθεί πως η μορφή του πολύστρωτου δεν έχει κανέναν περιορισμό δηλαδή μπορεί να είναι είτε επίπεδο είτε κελυφοειδές.

Οι κυριότερες υποθέσεις της κλασικής θεωρίας των πολύστρωτων χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη επίπεδης εντατικής κατάστασης και της υπόθεσης του *Kirchhoff* για τις πλάκες, με την πρώτη να ορίζεται ως:

$$\sigma_z = 0, \quad \tau_{yz} = 0, \quad \tau_{zx} = 0 \quad (2.20)$$

Όσον αφορά την υπόθεση του *Kirchhoff* θα πρέπει να ικανοποιούνται δύο υποθέσεις για να μπορεί να εφαρμοστεί. Η πρώτη έχει να κάνει με το γεγονός ότι αγνοείται η παραμόρφωση που είναι κάθετη στο μέσο επίπεδο και επομένως ισχύει:

$$\varepsilon_z = 0 \quad (2.21)$$

Ενώ η δεύτερη υπόθεση έχει να κάνει με την αγνόηση των εγκάρσιων διατμητικών παραμορφώσεων και επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \quad (2.22)$$

2.1.8 Καταστατικές εξισώσεις πολύστρωτου

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία πλακών, ανεξαρτήτως αν γίνεται αναφορά σε πολύστρωτο ή όχι, υιοθετείται η ύπαρξη συνεπίπεδων δυνάμεων N_i και ροπών M_i οι οποίες είναι ανοιγμένες ανά μονάδα μήκους. Οι δυνάμεις και οι ροπές προκύπτουν ολοκληρώνοντας κατά το πάχος τις αντίστοιχες τάσεις, ενώ έχουν ως έδρα την μέση

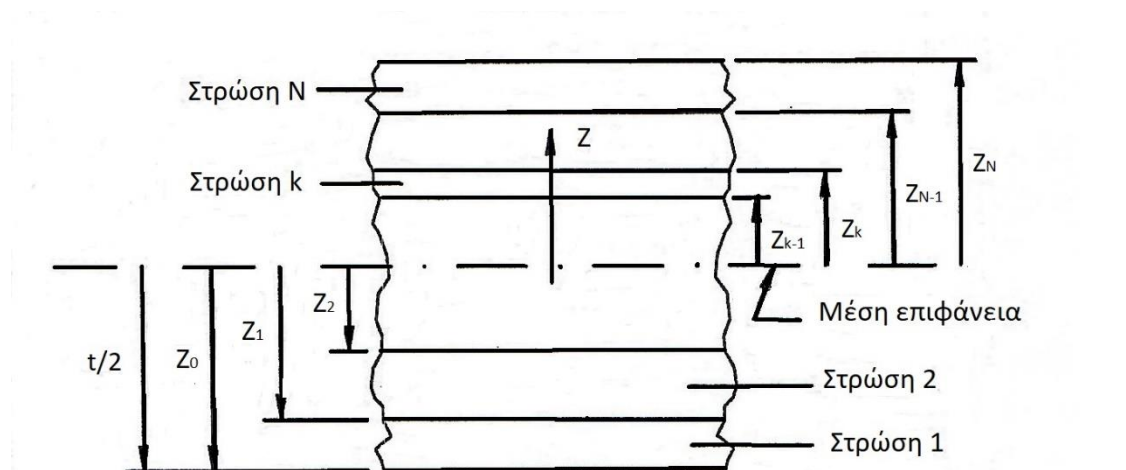
επιφάνεια της πλάκας. Η θεώρηση αυτή υιοθετείται όταν εξετάζονται πολύστρωτα, με ένα από τα πλεονεκτήματα που απορρέει από αυτήν να είναι ότι δεν υπάρχει εξάρτηση από την συνιστώσα του πάχους, Z . Παρόλα αυτά το πάχος λαμβάνεται υπόψη στον ορισμό των μεγεθών αυτών. Οι δυνάμεις αλλά και οι ροπές για ένα πολύστρωτο με N στρώσεις μπορούν να οριστούν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_k dz \quad (2.23)$$

και

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_k z dz \quad (2.24)$$

Όπου t ορίζεται το συνολικό πάχος του πολύστρωτου ενώ z_k και z_{k-1} ορίζεται το πάχος κάθε στρώσης, συμπεριλαμβανομένων των προηγούμενων με βάση τη μέση επιφάνεια του πολύστρωτου.



Σχήμα 2.3. Απεικόνιση τομής πολύστρωτου στην οποία προσδιορίζονται οι μεταβλητές που σχετίζονται με τον προσδιορισμό πάχους κάθε στρώσης [1].

Τα ολοκληρώματα των σχέσεων 2.23 και 2.24 μπορούν να επαναδιατυπωθούν λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως η ανοιγμένη δυσκαμψία είναι σταθερή σε όλη

την στρώση. Αυτό οδηγεί στην δυνατότητα να μπορεί βγει έξω από το ολοκλήρωμα ο πίνακας ανοιγμένης δυσκαμψίας και επομένως αντικαθιστώντας τις εξισώσεις τάσεων - παραμορφώσεων αποκτά την παρακάτω μορφή:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{xy0} \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \quad (2.25)$$

και

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{xy0} \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (2.26)$$

Επειδή τα μεγέθη ε_{x0} , ε_{y0} , ε_{xy0} , k_x , k_y , και k_{xy} δεν είναι συναρτήσεις του z , υπάρχει η δυνατότητα απαλοιφής τους από τα αθροίσματα με αυτό να συνεπάγεται πως οι παραπάνω σχέσεις θα πάρουν την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{xy0} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{xy0} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

όπου ισχύει ότι:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (2.29)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2.30)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2.31)$$

Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν τις καταστατικές εξισώσεις μιας πολύστρωτης επίπεδης πλάκας με τους πίνακες $[A]$, $[B]$ και $[D]$ να συμβολίζουν τους πίνακες εκτατικής δυσκαμψίας (*Extensional Stiffness Matrix*), σύζευξης (*Coupling Matrix*) και καμπτικής δυσκαμψίας (*Bending Stiffness Matrix*) αντίστοιχα. Κάθε ένας από τους πίνακες αυτούς δείχνει και έναν συγκεκριμένο τρόπο σύζευξης καθορίζοντας βασικές ιδιότητες του υλικού. Η ύπαρξη των πινάκων αυτών εξαρτάται από την ακολουθία των στρώσεων του πολύστρωτου.

Τα συμμετρικά πολύστρωτα (*Symmetric Laminates*) έχουν όλους τους όρους B_{ij} ίσους με μηδέν, ενώ αυτά με διασταυρούμενες στρώσεις (*Cross-Ply Laminates*) έχουν μηδενικά όλα τα στοιχεία των πινάκων με δείκτες 16 και 26.

2.2 Τρόποι και κριτήρια αστοχίας σύνθετων υλικών

Πολλές φορές τα χαρακτηριστικά των υλικών διαφέρουν και ο πιο συχνός λόγος είναι ότι έχουν πραγματοποιηθεί λανθασμένοι χειρισμοί κατά την αποθήκευση αλλά και πολύ περισσότερο κατά την κατεργασία αυτών. Τα ναυπηγεία συνηθίζεται να μην έχουν την δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών αλλά και γραμμών παραγωγής με κατάλληλα πρότυπα τα οποία να μπορούν να προλαμβάνουν τυχόν κατασκευαστικά λάθη σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η αδυναμία αυτή οδηγεί πολλούς κατασκευαστές στο να αγνοούν και να επικεντρώνονται κυρίως σε μακροσκοπικές ατέλειες με τους κανονισμούς των νηογνομόνων να ακολουθούν.

Κατά την κατασκευή, παράγοντες όπως είναι οι κατασκευαστικές ατέλειες, η παρουσία χημικών ουσιών, ο ακατάλληλος προσανατολισμός των ινών, η υγρασία, εγκλωβισμένος αέρας, ακόμα και η θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορούν να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα. Έρευνες έχουν δείξει [3] ότι τα τυχόν κενά εγκλωβισμένου αέρα, ο μη σωστός προσανατολισμός αλλά και η διαφορά στα πάχη μπορεί να επηρεάσουν το κόστος της κατασκευής αλλά και το βάρος της σε ποσοστό άνω του 2%.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που οδηγούν σε αστοχία, και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, είναι η αποκόλληση καθώς έχει βρεθεί πως στην

περίπτωση άσκησης πίεσης σε πειραματικά δοκίμια, παρατηρήθηκε μείωση κατά 38.6% στο συνολικό φορτίο που μπορούν να δεχτούν [3].

Οι κύριοι λόγοι αστοχίας των σύνθετων υλικών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, που σχετίζονται με την αντοχή και τη δυσκαμψία αντίστοιχα. Στην περίπτωση της αντοχής συμβαίνει αστοχία όταν η επιβαλλομένη τάση υπερβεί την οριακή που μπορεί να δεχτεί το πολύστρωτο, ενώ στην περίπτωση της δυσκαμψίας παρατηρείται όταν οι παραμόρφωση ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια. Παρακάτω παρατίθενται οι βασικές περιπτώσεις που μπορεί να συμβεί αστοχία σε σύνθετο υλικό [1].

Αστοχία σε περίπτωση εφελκυσμού: Στην περίπτωση εφελκυσμού που το φορτίο ασκείται παράλληλα στη διεύθυνση της ίνας, συνηθίζεται να εμφανίζεται αστοχία πρώτα στην μήτρα και μετά στις ίνες. Το αξιοσημείωτο είναι ότι παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο σε ίνες από άνθρακα. Τη στιγμή που οι ίνες θραύονται το φορτίο μεταφέρεται σε άλλες παρακείμενες μέσω της ρητίνης, έτσι το δοκίμιο μπορεί να μην αστοχήσει πλήρως άμεσα, δεδομένου ότι ακόμα και με την θραύση ορισμένων ινών, αυτές μπορούν να συνεχίσουν να εξυπηρετούν το ενισχυτικό έργο τους σε μικρότερο βαθμό. Στην περίπτωση εφελκυσμού κάθετα στην διεύθυνση των ινών, συνήθως πραγματοποιείται ρωγμάτωση της μήτρας και αποχωρισμός της ίνας λόγω διάσπασης των δεσμών ίνας - μήτρας. Το αρνητικό στην περίπτωση αυτή είναι ότι οι ίνες λειτουργούν ως μέσο αύξησης των τάσεων ενώ το θετικό είναι ότι μπορούν να περιορίσουν την διάδοση των ρωγμών.

Κύρια οπτικά δείγματα που μπορούν να οδηγήσουν στο εντοπισμό ενδείξεων αστοχίας από εφελκυσμό στο δείγμα είναι τα ακόλουθα:

- **Ραγίσματα (Crazing):** Εντοπίζονται στην επιφάνεια του *Gel Coat* και αποτελούν το αρχικό επιφανειακό σημάδι αστοχίας από εφελκυσμό. Αξίζει να αναφερθεί πως το νερό, τα λάδια, και οι διαλύτες επιταχύνουν την εξάπλωση τους. Στην περίπτωση των ραγισμάτων αν και αυτά εκτείνονται προς το εσωτερικό του δοκιμίου, μπορούν να μεταφέρουν τάσεις και αυτό το χαρακτηριστικό τις κατατάσσει σε μη πραγματικές αστοχίες.
- **Ρωγμές :** Η δημιουργία αυτών οφείλεται στην παρουσία υψηλών τάσεων ή παραμορφώσεων, υψηλών θερμοκρασιών, υπεριώδους ακτινοβολίας και

χημικού περιβάλλοντος. Στην περίπτωση των ρωγμών γίνεται αναφορά σε αστοχία δεδομένου ότι αυτές δεν μπορούν να μεταβιβάσουν τυχόν ασκούμενες τάσεις.

- **Γαλακτώδης απόχρωση (*Whitening*):** Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν τα πλαστικά έχουν φτάσει κοντά στο όριο των αποδεκτών τάσεων με αποτέλεσμα να αποκτούν μια υπόλευκη εμφάνιση.

Αστοχία σε περίπτωση θλίψης και κάμψης: Στη περίπτωση θλιπτικών φορτίων που ασκούνται στην διεύθυνση των ινών παρατηρείται ότι οι ίνες συμπεριφέρονται όπως οι δοκοί-κολώνες, με ελαστική επίδραση που προσδίδεται από την μήτρα που τις περιβάλλει. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση υφίστανται μικροσκοπικό λυγισμό των μεμονωμένων ινών. Ο λυγισμός μπορεί να έχει τρεις τύπους έκτασης (εκτός φάσης) και διάτμησης (σε φάση) κατά τις οποίες παρατηρείται η παρουσία έκκεντρων ζωνών (*kink bands*).

Στην περίπτωση αστοχίας από θλίψη σε πολύστρωτα καθοριστική σημασία έχουν η παρουσία ατελειών όπως είναι η μη σωστή ευθυγράμμιση των ινών, ο ατελής δεσμός ίνας-μήτρας, τυχόν κενά, καθώς και η γειτνίαση των ινών. Οι ατέλειες αυτές πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη σε ναυπηγικές κατασκευές, ειδικά στις περιπτώσεις που έχουμε κατασκευή υποβρυχίων στα οποία η εμφάνιση θλιπτικών τάσεων είναι αυξημένη.

Η αστοχία από κάμψη ξεκινάει συνήθως από τις εξωτερικές στρώσεις του πολύστρωτου και εξαπλώνεται προς τα μέσα. Αξίζει να επισημανθεί πως έχει παρατηρηθεί ότι η αντοχή των πολύστρωτων σε καμπτικές δυνάμεις είναι ελαφρώς υψηλότερη εκείνων σε εφελκυσμό ή θλίψη.

Αστοχία σε περίπτωση κόπωσης: Στην ναυπηγική οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις εναλλασσόμενων φορτίων παρατηρούνται από την επίδραση των κυματισμών, των δονήσεων της μηχανής αλλά και της έλικας. Στην περίπτωση πολύστρωτων από *CSM* και *WR* παρατηρείται σταδιακή αστοχία από κόπωση η οποία ξεκινά με αποκόλληση των ινών από την μήτρα και συνεχίζεται με ρωγμάτωση αυτής. Στη συνέχεια οι ρωγμές διαδίδονται παράλληλα με τις ίνες μέχρι να πραγματοποιηθεί

ολική αστοχία. Στα σύνθετα υλικά υπάρχουν τέσσερις βασικοί μηχανισμοί οι οποίοι είναι αποτέλεσμα της κόπωσης:

- Η ρωγμάτωση της μήτρας (*Matrix Cracking*).
- Ο αποχωρισμός των στρώσεων (*Delamination*).
- Η θραύση των ινών.
- Η αποκόλληση ινών - μήτρας.

Το γεγονός ότι τα σύνθετα εμφανίζουν ανισοτροπικότητα, αλλά και μια πολυπλοκότητα που αλλάζει ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής, καθιστά αρκετά δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό της επίδρασης της κόπωσης στις περισσότερες περιπτώσεις. Η αντοχή σε κόπωση των ινωδών συνθέτων υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των μετάλλων.

Τα πολύστρωτα *FRP* τα οποία έχουν μεγάλη περιεκτικότητα κατ' όγκο σε ίνες, είναι περισσότερο ευπαθή σε κόπωση από θλιπτικά φορτία αντί από εφελκυσμό, ενώ έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες πολύστρωτων από *GRP* έχει θετική επίδραση στην αντοχή των πολύστρωτων σε κόπωση. Δεδομένης της μεγάλης ποικιλίας συνθέτων υλικών αλλά και του διαφορετικού τρόπου χρήσης ο υπολογισμός της διάρκειας της εκάστοτε κατασκευής από κόπωση πρέπει να λαμβάνεται ως μια ένδειξη αφού γίνουν οι κατάλληλες πειραματικές δοκιμές.

Αστοχία λόγω φαινομένων ερπυσμού: ο ερπυσμός είναι η αύξηση των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε ένα υλικό σε μια χρονική περίοδο όταν βρίσκεται υπό την επίδραση σταθερής τάσης. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη ναυπηγική. Στη ναυπηγική, το φαινόμενο του ερπυσμού παρατηρείται κυρίως σε υπερστεγάσματα και εδράσεις μηχανών. Στην περίπτωση πολύστρωτων από *FRP* με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ο ερπυσμός είναι κυρίως ιξωδοελαστικός με αυτό να συνεπάγεται πως στην περίπτωση που υφίσταται απομάκρυνση φορτίων μεσαίου μεγέθους παρατηρείται μείωση του ερπυσμού. Στην περίπτωση που τα φορτία είναι μεγάλα μετά την απομάκρυνση τους συνεχίζεται η παρουσία πλαστικών παραμορφώσεων που σχετίζονται με τη ρωγμάτωση της μήτρας και την αποκόλληση ινών. Πρέπει να αναφερθεί πως ακόμα και στην περίπτωση που οι τάσεις δεν είναι υψηλές αλλά επιβάλλονται για μεγάλο χρονικό

διάστημα τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των υψηλών τάσεων. Η βύθιση σε νερό ή οξέα αλλά και οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν σημαντικά την επίδραση που έχει η άσκηση των παρατεταμένων φορτίων στο σύνθετο με καθοριστικό παράγοντα τον τύπο τις ίνας αλλά και της μήτρας.

Στη ναυπηγική, συνηθίζεται στην περίπτωση φορτίων μικρής διάρκειας να μη λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο του ερπυσμού. Το αντίθετο όμως συμβαίνει σε κατασκευαστικά στοιχεία που εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και σε μακροχρόνιες φορτίσεις.

Αστοχία σε περίπτωση κρούσης: Η χρήση συνθέτων υλικών στη ναυπηγική οδήγησε σε σύντομο χρονικό διάστημα στην αισθητή μείωση του βάρους των μικρών σκαφών σε συνάρτηση με την αύξηση της ταχύτητας τους. Παρόλα αυτά ως αρνητική επίπτωση υπήρξε η αύξηση της εμφάνισης αστοχιών λόγω κρούσης. Στην θάλασσα το πλοίο δέχεται κρουστικές δυνάμεις από διάφορες πηγές, από τις οποίες, οι πιο σημαντικές είναι οι πλάγιες υδροδυναμικές πιέσεις λόγω σφυρόκρουσης, καθώς και οι κρούσεις από συγκεντρωμένες δυνάμεις. Επιπλέον, στα πολεμικά σκάφη συνηθίζεται να λαμβάνονται υπόψιν τα ωστικά κύματα από τυχόν εκρήξεις.

Στη ναυπηγική είναι αδύνατο να καθοριστούν πλήρως και με σαφήνεια όλες οι πηγές κρουστικών φορτίων, όμως είναι αναγκαίο κατά την σχεδίαση να υπάρχει μια σαφής εικόνα και πλήρης κατανόηση για τις απαιτήσεις που θα πρέπει να πληροί η κατασκευή πριν από την τελική σχεδίαση. Βασικό χαρακτηριστικό που δεν θα πρέπει να αγνοηθεί είναι το γεγονός πως τα σύνθετα υλικά έχουν γενικά μικρή ικανότητα για πλαστικές παραμορφώσεις. Η γεωμετρία αλλά και η δυσκαμψία των υλικών είναι αυτή που καθορίζει τη μέγιστη ενέργεια που μπορούν να απορροφήσουν έτσι ώστε να μην ξεπεραστεί η ελαστική περιοχή λειτουργίας τους.

Στα σύνθετα υλικά για τον περιορισμό των επιπτώσεων από το φαινόμενο της κρούσης θα πρέπει να λαμβάνεται σημαντικά υπόψη το είδος των ενισχύσεων ο προσανατολισμός αυτών, το υλικό του πυρήνα (στην περίπτωση που υπάρχει), η μέθοδος κατασκευής αλλά και το υλικό της μήτρας. Σημαντική αστοχία που μπορεί να προκληθεί από την επίδραση κρουστικών δυνάμεων είναι αποκόλληση

συνδέσεων (*joints*), όπως αυτές των ενισχυτικών με την γάστρα, που μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικές συνέπειες για όλο το σκάφος.

Έχει παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση κρούσης σε σύνθετα υλικά τύπου *Sandwich* που είχαν πυρήνες με μεγαλύτερη πυκνότητα, αυτά είχαν καλύτερη συμπεριφορά από αντίστοιχα μικρότερης πυκνότητας, ενώ όσο πιο εύκαμπτος και αφρώδης ήταν ο πυρήνας, τόσο καλύτερα ήταν τα αποτελέσματα [1].

Συμπερασματικά, σχετικά με την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών ισχύουν τα εξής (*SSC 403-1997*):

- Οι ίνες *Kevlar* και οι ίνες γυαλιού *S* είναι καλύτερες από τις ίνες γυαλιού *E* και τις ίνες άνθρακα.
- Οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι καλύτερες από τις εποξικές και τις πολυεστερικές.
- Οι αφρώδεις πυρήνες είναι καλύτεροι από άλλους, όπως είναι το *Balsa* και το *Nomex*.
- Τα ψευδο-ισοτροπικά πολύστρωτα είναι καλύτερα από τα ορθοτροπικά.
- Πολλές λεπτές στρώσεις ενισχύσεων είναι καλύτερες από λίγες στρώσεις μεγάλου πάχους.

Αστοχία από την επίδραση της θερμοκρασίας: Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν δεδομένου ότι επηρεάζει την δυσκαμψία και την αντοχή των σύνθετων είναι η θερμοκρασία. Για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών σε σκάφη από *FRP* αποφεύγεται η χρήση *Gel Coat* σε μαύρη απόχρωση σχεδόν σε όλα τα τμήματα του σκάφους. Ειδική μελέτη θα πρέπει να πραγματοποιείται για περιοχές του σκάφους όπως είναι το μηχανοστάσιο αλλά και οι κουζίνες όπου δημιουργούνται εστίες υψηλών θερμοκρασιών με τεχνητό τρόπο. Όσον αφορά την έκθεση του σκάφους κατευθείαν στον ήλιο τις περισσότερες φορές η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τα όρια, κυρίως λόγω της επίδρασης των κυματισμών. Θα πρέπει να σημειωθεί πως σχεδόν ποτέ δεν παρατηρείται ισοκατανομή της θερμοκρασίας αλλά σε τοπικά σημεία παρατηρούνται θερμοκρασιακές μεταβολές.

Ενδεικτικά παρακάτω αναφέρονται ορισμένα στοιχεία που δείχνουν πως η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει την αντοχή των ενισχυτικών ινών:

- Οι ίνες άνθρακα διατηρούν την αντοχή και την δυσκαμψία τους σε θερμοκρασίες έως 1000 °C.
- Οι ίνες από γυαλί E έχουν μείωση 75% της αντοχής τους σε θερμοκρασία 350 °C και 50% σε θερμοκρασία 500 °C σε σχέση με την αντοχή σε θερμοκρασία 20 °C.
- Οι αντοχή των ινών *Kevlar 49* μειώνεται κατά 75% στους 200° C και κατά 60% στους 300 °C σε σχέση με αυτή στους 20 °C.

Εξίσου σημαντικό είναι πως τα *GRP* και *FRP* μερικές φορές όχι μόνο διατηρούν τις ιδιότητες τους σε χαμηλές θερμοκρασίες αλλά εμφανίζουν και σημαντική αύξηση αυτών. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει την εξάπλωση της χρήσης τους και σε άλλες ναυπηγικές κατασκευές όπως είναι οι δεξαμενές μεταφοράς *LNG*.

Αστοχία από την εκδήλωση πυρκαγιάς: Σε κάθε περίπτωση στη θάλασσα η δημιουργία φωτιάς προκαλείται από τεχνητά μέσα και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, έτσι ώστε να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η εξάπλωσή της. Ο σχεδιαστής, ως βασικούς στόχους θα πρέπει να έχει την αποτροπή της μετάδοσης της φωτιάς σε διπλανά διαμερίσματα, τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών, την διατήρηση της αντοχής στο μέγιστο δυνατό βαθμό σε συνθήκες πυρκαγιάς, αλλά και την ελαχιστοποίηση της εκπομπής καπνού και παραγόμενων τοξικών αερίων.

Όσον αφορά τα *GRP* με πολυεστερική ρητίνη παρατηρείται αργή καύση αλλά ταυτόχρονα και εκπομπή μεγάλης ποσότητας μαύρου καπνού. Η κατάσβεση μπορεί να γίνει ακόμα και με χρήση νερού ή αποστέρησης του οξυγόνου. Στην περίπτωση μήτρας με φαινολικές ρητίνες παρατηρείται εκπομπή μικρότερης ποσότητας καπνού αλλά αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες.

Χάρη στην υψηλή μονωτική ιδιότητα των σύνθετων υλικών *GRP*, αυτά έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση πολύστρωτων *Sandwich* έχουν επίσης καλές μονωτικές ιδιότητες, όμως χρειάζεται προσοχή στην επιλογή του πυρήνα και των περιβλημάτων. Στην περίπτωση που τα περιβλήματα είναι λεπτά μπορεί να

καθιστούν τον πυρήνα ευάλωτο σε υψηλές θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Τόσο η *Solas* αλλά και ο *IMO* έχουν καθορίσει διαδικασίες εκτίμησης των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών αλλά και δοκιμές που πρέπει να γίνονται σε δοκίμια ώστε να εξασφαλίσουν την ασφάλεια του σκάφους.

Αστοχία από την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων: Οι επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως είναι η έκθεση στον άνεμο, την βροχή, τον ήλιο αλλά και η βύθιση στο νερό θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη, δεδομένου ότι για ένα πολύ μεγάλο διάστημα τα υλικά θα βρίσκονται εκτεθειμένα σε αυτές.

Στην περίπτωση πολύστρωτων *FRP*, παρατηρείται διείσδυση νερού μέσω ρωγμών και κενών αέρα ή άλλων ατελειών. Μελέτες σε δοκίμια τα οποία τοποθετήθηκαν χωρίς φορτίσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα στο νερό έδειξαν μια μείωση της τάξεως του 20% του μέτρου ελαστικότητας του *Young*, 20% της αντοχής σε εφελκυσμό, 30% της αντοχής σε κάμψη και 35% της αντοχής σε θλίψη [12]. Τις περισσότερες φορές τα πολύστρωτα στη ναυπηγική προστατεύονται από χρώμα ή επίστρωση χρώματος *Gel Coat* ώστε να μειωθεί η διείσδυση νερού.

Αστοχία από την επίδραση της ώσμωσης: Η ώσμωση (κοινώς φουσκάλιασμα της επιφάνειας των πολύστρωτων) αποτελεί κυρίως αισθητικό πρόβλημα με αυτό να σημαίνει πως απασχολεί ιδιαίτερα τους ιδιοκτήτες σκαφών αφού η αξία του σκάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτήν. Η ώσμωση πραγματοποιείται από την δημιουργία ωσμωτικής πίεσης σε θυλάκες νερού στο *Gel Coat* και πιο συγκεκριμένα μεταξύ αυτού και του πολύστρωτου.

Στην περίπτωση πολύστρωτων, με πολυεστερική ρητίνη, η συνιστώμενη πρακτική για την αποφυγή της δημιουργίας ώσμωσης είναι:

- Αποφυγή υγρασίας στο χώρο κατασκευής και αποθήκευσης.
- Εξασφάλιση του πλήρους βαθμού πολυμερισμού.
- Μείωση των κενών στο *Gel Coat*.
- Χρήση ρητινών όπως είναι οι ρητίνες ισοφθαλικού τύπου, που υπόκεινται σε μικρότερη επίδραση από το νερό.
- Μη χρήση υδατοδιαλυτών συστατικών στη μήτρα.

- Αποφυγή σκούρων προσθετικών βαφής στο *Gel Coat* γιατί έχει παρατηρηθεί ότι ευνοούν την ώσμωση.
- Χρήση *Gel Coat* με υδατοδιαλυτότητα όχι μεγαλύτερη από εκείνη του υποκείμενου πολύστρωτου.
- Τοποθέτηση στρώσης ρητίνης πριν από το *Gel Coat*.

Ο τρόπος επισκευής των φυσαλίδων από ώσμωση συνίσταται σε λείανση της περιοχής που έχει προσβληθεί και στη τοποθέτηση εποξικής συνήθως κόλλας σε συνδυασμό με ίνες αν το πρόβλημα εμφανίζεται σε μεγάλη έκταση. Στο τέλος είναι αναγκαίο να τοποθετείται στην περιοχή επίστρωση από εποξική ή ακρυλική βαφή.

2.2.1 Κριτήρια αστοχίας στρώσης

Σε όλα τα υλικά ο καθορισμός της αντοχής τους προσδιορίζεται με πειραματικές μεθόδους οι οποίες είναι τυποποιημένες σε δοκίμια τα οποία πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα σχεδιαστικά πρότυπα. Στα δοκίμια αυτά εφαρμόζονται φορτίσεις, με το μέγιστο φορτίο να είναι αυτό που καθορίζει την αντοχή υλικών και το οποίο αντιστοιχεί στο όριο θραύσης.

Στην περίπτωση κατασκευών μπορεί να εμφανίζεται απλό ή πολύπλοκο πεδίο τάσεων. Η διαφορά αυτών έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση απλού πεδίου τάσεων είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις τυποποιημένες-πιστοποιημένες πειραματικές δοκιμές μέτρησης αντοχών καταλήγοντας άμεσα σε συμπεράσματα ενώ στην άλλη περίπτωση αυτό είναι πρακτικά αδύνατο.

Στην πράξη η πλειονότητα των κατασκευών υπόκεινται σε διαξονικές εντατικές καταστάσεις με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν ανέφικτος ο υπολογισμός της αντοχής του υλικού με τις συνήθεις μεθόδους. Για να μπορέσει όμως να δημιουργηθεί μια εικόνα χρησιμοποιούνται κριτήρια αστοχίας. Όσον αφορά τα ιστροπικά υλικά τα κριτήρια αστοχίας (όπως για παράδειγμα το κριτήριο *Von Mises*) αποτελούν συνάρτηση των κύριων τάσεων και των ορίων αντοχής σε θλίψη, διάτμηση και εφελκυσμό. Επομένως έχοντας αυτές τις τρεις αντοχές του υλικού μπορεί να προβλεφθούν οι μηχανικές ιδιότητες ενός ιστροπικού υλικού.

Όσον αφορά τα ορθοτροπικά υλικά μπορούμε να μετρήσουμε άπειρο αριθμό αντοχών οι οποίες αλλάζουν εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ελαστικές τους σταθερές μεταβάλλονται στις διάφορες διευθύνσεις. Για να μπορέσει ο σχεδιαστής να έχει μια εικόνα κατά την σχεδίαση περιορίζεται ο αριθμός των αντοχών σε πέντε κυρίες διευθύνσεις του υλικού. Οι αντοχές αυτές είναι η αντοχή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση 1, X_t , η αντοχή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση 2, Y_t , η αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση 1, X_c , η αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση 2 Y_c , και η αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο 1-2, S .

Για να μπορέσει να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων έχουν δημιουργηθεί ποικίλα κριτήρια αστοχίας για ορθοτροπικά υλικά τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται συνδυαστικά. Ακολουθως, θα αναφερθούν ορισμένα ευρέως διαδεδομένα κριτήρια αστοχίας που βρίσκουν εκτεταμένη χρήση στην περίπτωση ινωδών συνθέτων υλικών. Ονομαστικά αυτά περιλαμβάνουν: το κριτήριο μέγιστης τάσης, το κριτήριο *Tsai-Hill*, το κριτήριο *Tsai-Wu* και το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης.

Κριτήριο μέγιστης τάσης

Με βάση το κριτήριο αυτό, στην περίπτωση που σε οποιαδήποτε από τις κύριες διευθύνσεις του υλικού παρουσιαστεί τάση που υπερβαίνει την επιτρεπόμενη, θεωρείται πως το υλικό έχει αστοχήσει. Αυτό συνεπάγεται ότι θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω ανισότητες για την αποφυγή αστοχίας σε περίπτωση εφελκυστικών τάσεων [1]:

$$\sigma_1 < X_t, \sigma_2 < Y_t, |\tau_{12}| < S \quad (2.32)$$

και στην περίπτωση θλιπτικών τάσεων:

$$\sigma_1 < X_c, \sigma_2 < Y_c \quad (2.33)$$

Αξίζει να επισημανθεί πως σε αυτό το κριτήριο αρκεί να μην ικανοποιείται μια τουλάχιστον από τις παραπάνω ισότητες και όχι όλες ταυτόχρονα, για να θεωρηθεί ότι το υλικό έχει αστοχήσει.

Κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης

Με βάση αυτό το κριτήριο στην περίπτωση που σε οποιαδήποτε από τις κύριες διευθύνσεις του υλικού παρουσιαστεί παραμόρφωση που υπερβαίνει την επιτρεπόμενη, θεωρούμε ότι έχουμε αστοχία [1]. Αυτό συνεπάγεται ότι θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω ανισότητες για την αποφυγή αστοχίας σε περίπτωση εφελκυστικών τάσεων:

$$\varepsilon_1 < X_{\varepsilon t}, \quad \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon t}, \quad |\gamma_{12}| < S_{\varepsilon} \quad (2.34)$$

και στην περίπτωση θλιπτικών τάσεων:

$$\varepsilon_1 < X_{\varepsilon c}, \quad \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon c} \quad (2.35)$$

όπου $X_{\varepsilon c}$ και $X_{\varepsilon t}$ συμβολίζουν την μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική - εφελκυστική παραμόρφωση στη διεύθυνση 1, $Y_{\varepsilon t}$ και $Y_{\varepsilon c}$ η μέγιστη επιτρεπόμενη εφελκυστική - θλιπτική παραμόρφωση στη διεύθυνση 2 και S_{ε} η μέγιστη επιτρεπόμενη διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο 1-2.

Στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά μέχρι τη θραύση, μπορεί να υπολογιστούν με ευκολία οι επιτρεπόμενες παραμορφώσεις από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X_{\varepsilon t} = X_t/E_2, \quad Y_{\varepsilon t} = Y_t/E_2, \quad S_{\varepsilon} = S/G_{12} \quad (2.36)$$

Στην περίπτωση ορθοτροπικής στρώσης με φορτίο το οποίο σχηματίζει γωνιά θ με την κύρια διεύθυνση υλικού 1, τότε οι παραμορφώσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\varepsilon_1 = (\cos^2\theta - \nu_{12} \sin^2\theta) \sigma_x / E_1 \quad (2.37)$$

$$\varepsilon_2 = (\sin^2\theta - \nu_{21} \cos^2\theta) \sigma_x / E_2 \quad (2.38)$$

$$\gamma_{12} = -(\sin\theta \times \cos\theta) \sigma_x / G_{12} \quad (2.39)$$

Κριτήριο Tsai-Hill

Λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο αυτό, θεωρείται ότι το δοκίμιο υφίσταται αστοχία όταν σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης δεν ισχύει η παρακάτω ανισότητα [1]:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{T_{12}^2}{S^2} < 1 \quad (2.40)$$

Στην περίπτωση που οι τάσεις σ_1 , σ_2 και τ_{12} στους κύριους άξονες του υλικού είναι εφελκυστικές, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι αντοχές σε εφελκυσμό ενώ το ίδιο ισχύει σε περίπτωση που οι τάσεις είναι θλιπτικές.

Το κριτήριο αυτό διατυπώθηκε στην παραπάνω μορφή από τον Tsai (1968) ενώ ονομάστηκε Tsai-Hill γιατί βασίστηκε σε προγενέστερο κριτήριο αστοχίας του Hill (1950) για ανισοτροπικά υλικά. Βασική διάφορα αυτού του κριτηρίου αστοχίας από τα δύο προηγούμενα που αναφέρθηκαν είναι πως λαμβάνει υπόψιν του για την πρόβλεψη της αστοχίας την αλληλεπίδραση μεταξύ διάφορων αντοχών. Συχνά προτιμάται το κριτήριο Tsai-Hill από τα δύο προηγούμενα δεδομένου ότι συχνά δίνει αποτελέσματα με μικρότερη απόκλιση από τα πειραματικά μοντέλα, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση ισοτροπικού υλικού, κάτι που δεν ισχύει για τα αλλά δύο κριτήρια.

Κριτήριο Tsai-Wu

Το κριτήριο αυτό δημιουργήθηκε το 1971 από τους Tsai και Wu, με σκοπό να μειώσουν την διαφορά μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών από τα κριτήρια αστοχίας. Στο κριτήριο αυτό έγινε προσαρμογή με βάση πειραματικά αποτελέσματα και εισάχθηκαν διάφορες αντοχές σε μητρική μορφή. Επομένως κατέληξαν στο κριτήριο ότι υπάρχει μια επιφάνεια αστοχίας στο χώρο των τάσεων που έχει τη μορφή [1]:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad \text{με } i, j = 1, \dots, 6 \quad (2.41)$$

Ως F_i και F_{ij} ορίζουμε τα μητρώα αντοχής δεύτερης και τέταρτης τάξης αντίστοιχα. Χρήση των μητρώων αυτών καθιστά την παραπάνω σχέση αρκετά πολύπλοκη.

Επομένως σε περίπτωση ορθοτροπικής στρώσης σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, για να μην προκύπτει αστοχία σύμφωνα με το κριτήριο αυτό θα πρέπει να ισχύει:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (2.42)$$

για την οποία, ισχύουν:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} , & F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\ F_{11} &= -\frac{1}{X_t X_c} , & F_{22} &= -\frac{1}{Y_t Y_c} \\ F_6 &= 0, & F_{66} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right]$$

Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που η τιμή σ (αντοχή υλικού σε διαξονικό εφελκυσμό) είναι άγνωστη αλλά και ταυτόχρονα δύσκολο να προσδιοριστεί πειραματικά. Για το λόγο αυτό έχουν διατυπωθεί δύο άλλες προσεγγιστικές σχέσεις για τον υπολογισμό του F_{12} :

Η σχέση που προτάθηκε το 1980 από τους *Tsai* και *Hahn*:

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}} \quad (2.44)$$

και η σχέση που προτάθηκε το 1984 από τους *Wu* και *Stachurski*:

$$F_{12} = -\frac{1}{X_t X_c + Y_t Y_c} \quad (2.45)$$

Όλα τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω εφαρμόζονται σε περιπτώσεις διαξονικής εντατικής κατάστασης. Ως πρώτη κίνηση σε κάθε περίπτωση κατά την εφαρμογή των κριτηρίων, πραγματοποιείται μετασχηματισμός (αν αυτός είναι αναγκαίος) των τάσεων σ_x , σ_y και τ_{xy} στις τάσεις σ_1 , σ_2 και τ_{12} στις κυρίες διευθύνσεις υλικού 1 και 2. Έπειτα ανάλογα με το κριτήριο αστοχίας που θα επιλεγθεί, με

σύγκριση ή αντικατάσταση στους αντίστοιχους τύπους προκύπτει η εκτίμηση αν τελικά υφίσταται αστοχία ή όχι.

Στα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω στην περίπτωση των διατμητικών τάσεων θεωρήθηκε αμελητέα η επίδραση του προσήμου στην αντοχή. Αυτή η απλοποίηση δεν ισχύει σε περίπτωση ορθοτροπικού υλικού.

Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως η επιλογή του κριτηρίου αστοχίας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που εξετάζεται καθώς και από το ποσό όλκιμο ή ψαθυρό είναι.

Πρόβλεψη διάδοσης ρωγμής στην μήτρα

Έχει παρατηρηθεί πως η αστοχία της μήτρας συνηθίζεται να προηγείται από αυτή της ενίσχυσης. Στην περίπτωση αστοχίας της μήτρας παρατηρείται άμεση μείωση του ποσοστού ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει το πολύστρωτο. Επομένως, η αποφυγή αυτών έχει κινήσει το ενδιαφέρον ερευνητών για την πρόληψη του φαινομένου. Μελέτες έχουν δείξει ότι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων βασιζόμενες στον πρώτο νομό της θερμοδυναμικής μπορούν να προβλέψουν τη διάδοση της ρωγμής όταν ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας G στην επιφάνεια της ρωγμής είναι ίσος με ένα βασικό στοιχείο του υλικού που ονομάζεται κρίσιμη τιμή απελευθέρωσης ενέργειας G_c [14].

Επομένως για να μην πραγματοποιηθεί η διάδοση θα πρέπει να ισχύει ότι:

$$G = \frac{\Delta W}{\Delta A} - \frac{\Delta U}{\Delta A} < G_c \quad (2.46)$$

Οπού ΔU η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του πολύστρωτου κατά την διάρκεια μετάδοσης της ρωγμής, ΔW το έργο που δίνεται από εξωτερικές δυνάμεις και ΔA η επιφάνεια της ρωγμής.

Στην περίπτωση σταθερής μετατόπισης ο παραπάνω τύπος παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$G = -\frac{\Delta U}{\Delta A} < G_c \quad (2.47)$$

Στην περίπτωση σταθερής δύναμης ο τύπος θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$G = \frac{\Delta U_c}{\Delta A} < G_c \quad (2.48)$$

Όπου ΔU_c είναι μεταβολή της συμπληρωματικής ενέργειας κατά τη διαδικασία διάδοσης της ρωγμής.

2.3 Πειραματικές μέθοδοι μελέτης μηχανικών ιδιοτήτων

Για να μπορέσει ένας σχεδιαστής να πραγματοποιήσει σωστή επιλογή των κατάλληλων υλικών ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής είναι αναγκαίο να έχει τις απαραίτητες γνώσεις των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Τις γνώσεις αυτές μπορεί να τις αποκτήσει με διάφορους τρόπους όπως είναι οι πειραματικές δοκιμές, καταστρεπτικές και μη.

2.3.1 Πειραματικές δοκιμές μέτρησης ιδιοτήτων. Καταστροφικές μέθοδοι

Για τον έλεγχο των ιδιοτήτων της κατασκευής είναι συχνά αναγκαίο να έχουν προηγηθεί πειραματικές δομικές μέτρησης ιδιοτήτων. Παρακάτω παρατίθενται βασικές μέθοδοι πειραματικών δοκιμών:

Περιεκτικότητα σε ίνες, ρητίνη και κενά: Οι μετρήσεις αυτές γίνονται συνήθως με καταστρεπτικές δοκιμές σε μικρά δοκίμια της κατασκευής. Μια από τις πιο συχνές μεθόδους στην περίπτωση *GRP* αποτελεί η δοκιμή καύσης (*ASTM D2584*, *ISO 1172*) γνωστή ως *Burn-off test*. Η δοκιμή ξεκινά με την μέτρηση του βάρους και του όγκου του δοκιμίου, το οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται σε ελεγχόμενες συνθήκες (550 - 600 °C) μέχρι να εξαερωθεί το υλικό της μήτρας. Έχοντας πλέον μόνο τις ενισχυτικές ίνες μπορεί να προσδιοριστεί το βάρος αυτών και κατά συνέπεια η αναλογία αυτών

στο δοκίμιο. Για να εκτιμηθεί το ποσοστό των κενών γίνεται αφαίρεση του συνολικού όγκου των υλικών της μήτρας και της ενίσχυσης από τον αρχικό όγκο του δοκιμίου.

Στην περίπτωση που έχουμε *CFRP* (ενίσχυση με ίνες άνθρακα) χρησιμοποιείται η μέθοδος της χώνευσης της μήτρας (*Matrix Digestion, ASTM D3171*), επειδή στις υψηλές θερμοκρασίες ο άνθρακας οξειδώνεται και απομακρύνεται μέσω αερίων προϊόντων. Με την μέθοδο της χώνευσης πραγματοποιείται χρήση ενός διαλύτη όπως είναι το νιτρικό οξύ έτσι ώστε να διαλυτοποιηθεί και να απομακρυνθεί η ρητίνη από το σύνθετο. Μια σύγχρονη μέθοδος που έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος έναντι των άλλων είναι αυτή της φωτομικρογραφικής διαδικασίας για τον προσδιορισμό της κατά όγκο περιεκτικότητας.

Δοκιμές σε εφελκυσμό: Στις δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως μεγάλου μήκους δοκίμια στον οποίων τα άκρα συγκολλούνται προσαρτήματα (ενισχύσεις) από παρόμοιο υλικό ώστε να αποφευχθεί η πιθανή αστοχία στα σημεία στήριξης. Τα αναγνωρισμένα δοκίμια *CRAG* (*Composites Research advisory Group, Ministry of defence, UK*) και *BSI* (*British Standards Institute*) παρουσιάζουν μια πρόσθετη μείωση της εγκάρσιας διατομής στην μέση του δοκιμίου για την πρόκληση αστοχίας σε αυτή την περιοχή. Οι παραμορφώσεις προσδιορίζονται με την χρήση είτε μηχανικών είτε ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων αντίστασης.

Δοκιμές θλίψης: Κατά την διεξαγωγή αυτών των μετρήσεων είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη η αποφυγή του φαινομένου του λυγισμού. Τα δοκίμια προτιμάται να έχουν μεγάλο μήκος και μια μικρή κεντρική περιοχή μέτρησης, ενώ είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν προσαρτήματα. Βασικά πρότυπα δοκιμών θλίψης είναι τα *ASTM D 3410* και *IITRI* (*Illinois Institute of technology research institute, Carlsson-1987*), ενώ άλλες δοκιμές πραγματοποιούνται με το πρότυπο *ISO 604*, τη μέθοδο *NBS* (*National Bureau of standards*), τη μέθοδο *Face Supported* (*Whitney-1984*), την μέθοδο *SWRI* (*Southwest Research Institute, Whitney-1984*) και το πρότυπο *ASTM D 695*.

Δοκιμές σε κάμψη: Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε παράλληλες λωρίδες υλικού σε 3 ή 4 σημεία. Ευρέως αποδεκτά πρότυπα διεξαγωγής των δοκιμών είναι τα *ASTM D 790*, *ISO 178*, *EN63*, *CRAG* (*CURTIS 1985*).

Δοκιμές συνεπίπεδης διάτμησης: Η πιο απλή μέθοδος δοκιμής είναι αυτή του εφελκυσμού ενός δοκιμίου υπό γωνία +/- 45°, η οποία δίνει καλές εκτιμήσεις του μέτρου διάτμησης. Στη μέθοδο αυτή έχοντας ένα προκαθορισμένο δοκίμιο εφελκυσμού στο οποίο οι δυο βασικές διευθύνσεις έχουν προσανατολιστεί σε γωνίες +/- 45° ως προς την διεύθυνση x της επιβαλλομένης εφελκυστικής τάσης, οι διαμήκεις και εγκάρσιες παραμορφώσεις μετρούνται από επιμηκυνσιόμετρα. Εναλλακτικές μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων σε συνεπίπεδη διάτμηση είναι η δοκιμή *Losipescu* (*ASTM D 5379, Warlath-1987*) και αυτή με 2 ή 3 ράγες (*2- or 3- rail shear tests, ASTM D 4255*).

Δοκιμές διαστρωματικής διάτμησης: Η συνήθης μέθοδος προσδιορισμού είναι με μια δοκιμή κάμψης 3 σημείων σε δοκίμιο, το οποίο έχει σχετικά μικρό μήκος, και το οποίο φορτίζεται κατά τη διεύθυνση του πάχους έτσι ώστε να προηγηθεί η αστοχία της διάτμησης από αυτή της κάμψης. Η μέτρηση αυτή δεν είναι σε μεγάλο βαθμό ικανοποιητική γιατί μπορεί εύκολα να δώσει λανθασμένα στοιχεία εξαιτίας της αναπόφευκτης ύπαρξης τάσεων τόσο στο ίδιο το δοκίμιο όσο και στη στήριξη αυτού.

2.3.2 Μη καταστροφικές μέθοδοι για την ανίχνευση ατελειών

Ατέλειες μπορεί να δημιουργηθούν κατά την κατασκευή του συνθέτου ή από βλάβες κατά την λειτουργία του. Πιθανές ατέλειες μπορεί να είναι ο **αποχωρισμός στρώσεων** (*Delamination*) και η **αποκόλληση των συνδέσεων** (*Debonding*). Για την ανίχνευση αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου [2, 7, 12]:

Οπτική επιθεώρηση: Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει άμεσα στοιχεία για ατέλειες σε μακροσκοπικό επίπεδο και για αυτό δεν πρέπει να υποβαθμίζεται έναντι των άλλων μεθόδων ελέγχου.

Μέτρηση πάχους: Με τη χρήση μικρών φορητών συσκευών, συνήθως με τη χρήση υπέρηχων, μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί η μέτρηση. Για να αναγνωριστεί το αποτέλεσμα της μέτρησης ως ορθό η συσκευή θα πρέπει να φέρει πιστοποίηση από επίσημες αρχές όπως είναι οι Μηονγώμονες. Μη ορθές μετρήσεις

μπορεί να πραγματοποιηθούν λόγω αποχωρισμού στρώσεων ή ανομοιογένειας του υλικού.

Δοκιμές με υπέρηχους: Αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο ελέγχου ανίχνευσης αποχωρισμών και μεγάλων κενών. Κατά την υλοποίηση της συχνά σαρώνεται η συνολική επιφάνεια με σκοπό την δημιουργία ψηφιακής απεικόνισης αυτής.

Δοκιμές με ακουστική εκπομπή: Μέσω φόρτισης της κατασκευής ή του δοκιμίου και με την χρήση ειδικού μικροφώνου είναι δυνατόν να εντοπιστούν ατέλειες από την διαφορά των ήχων (θορύβων).

Δοκιμές με έλεγχο κραδασμών: Η πιο γνωστή μέθοδος είναι αυτή με το χτύπημα κέρματος κατά την οποία διεγείρονται οι ταλαντώσεις της κατασκευής σε ένα εύρος συχνοτήτων και οι ατέλειες εντοπίζονται από τις ανωμαλίες που προκύπτουν στην απόκριση του συντονισμού.

Ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων: Αρχικά πραγματοποιείται μέτρηση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών ενός ελευθέρως ταλαντούμενου δοκιμίου, το οποίο έχει μορφή πλάκας. Έπειτα μέσω ενός αναλυτικού μοντέλου συμπεριφοράς ορθοτροπικών πλακών - κραδασμών αντλούνται τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Άλλες μη καταστρεπτικές μέθοδοι μπορεί να είναι οι ραδιογραφικές, η θερμική απεικόνιση, οπτικές μέθοδοι και χημική φασματοσκοπία. Οι νηογνώμονες έχουν αναπτύξει ειδικούς κανονισμούς για σκάφη στα οποία έχει γίνει χρήση σύνθετων υλικών ή πρόκειται να γίνει (*ABS-1997, BV-1995, DNV-1993, LRS-1996, RINA-1987*). Όλοι οι κανονισμοί των νηογνυμένων καθορίζουν ελάχιστα πρότυπα αλλά και απαραίτητες δοκιμές σε περίπτωση χρήσης σύνθετων υλικών.

Η χρήση ακτινών-Χ αποτελεί μια πολύ γνωστή και υποσχόμενη τεχνική, λαμβάνοντάς υπόψη το γεγονός ότι αποτελεί μια μη καταστρεπτική μέθοδο. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν περιορίζεται από την γεωμετρία του αντικειμένου που εξετάζεται.

2.4 Οι πιο συχνές μέθοδοι κατεργασίας σύνθετων υλικών στην ναυπηγική

Τα σύνθετα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική είναι αυτά που φέρουν ινώδη ενίσχυση. Δίνοντας έμφαση σε αυτά, παρακάτω αναφέρονται μέθοδοι κατεργασίας που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στη ναυπηγική.

Η πιο συχνή μορφή κατασκευής γάστρας καταστρωμάτων και φρακτών από *FRP* είναι τα πολύστρωτα, τα οποία ανάλογα με τις απαιτήσεις ενισχύονται από επιμέρους ενισχυτικά. Τα ενισχυτικά που συνήθως χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική είναι συνήθως τύπου «καπέλου», λόγω της ευκολίας κατασκευής τους σε συνδυασμό με την υποστήριξη που προσφέρουν.

Τα πολύστρωτα χρησιμοποιούνται ακόμα και σε περίπτωση χρήσης *Sandwich* ώστε να αυξηθούν τα πλεονεκτήματα τα οποία παρέχουν. Πρέπει να αναφερθεί όμως πως οι γάστρες που αποτελούνται μόνο από *Sandwich* συνηθίζονται μόνο σε αγωνιστικά σκάφη στα οποία η ανάγκη για απόδοση έναντι της αντοχής είναι μεγαλύτερη.

Οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σκαφών και κυρίως της γάστρας είναι [1, 3, 5]:

Μορφοποίηση με απλή επαφή: Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τόσο μικρών αλλά και μεγάλων σκαφών. Η μέθοδος βασίζεται στην τεχνική εναπόθεσης με απλή επαφή (*Contact Moulding*), σε ανοικτό καλούπι, ενώ η ρητίνη και οι ίνες στερεοποιούνται εν ψυχρώ. Βασικά βήματα κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η σωστή προετοιμασία του καλουπιού και η χρήση κεριού για την μείωση τυχόν ανωμαλιών στην επιφάνεια αλλά και ειδικής στρώσης αποκολλητικού μέσου (*Release Film*) η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο λεπτή. Στην συνέχεια πραγματοποιείται εφαρμογή χρωματιστής εξωτερικής επικάλυψης από ρητίνη υψηλής ποιότητας (*Gel Coat*) η οποία τοποθετείται είτε με πινέλο είτε με ψεκασμό. Στην συνέχεια η διαδικασία συνεχίζεται πριν πολυμεριστεί πλήρως το *Gel Coat* με μια από τις παρακάτω μεθόδους:

Επίστρωση με ψεκασμό (*Spray-up*): Με τη χρήση πιστολιού ψεκασμού ψεκάζονται ίνες γυαλιού μήκους 25-50 mm μαζί με πολυεστερική ρητίνη στην οποία έχει προστεθεί και ο απαραίτητος καταλύτης (*Catalyst*) και επιταχυντής (*Accelerator*). Στη συνέχεια ασκείται πίεση με το χέρι χρησιμοποιώντας ρολό επίστρωσης. Η μέθοδος αυτή απαιτεί πολύ μικρότερη απαιτούμενη εργασία σε σχέση με την επόμενη μέθοδο. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο έλεγχος του πάχους δεν είναι εύκολα εφικτός.

Επίστρωση με το χέρι (*Hand Lay-up*): Σε αυτήν τη μέθοδο υγρή ρητίνη με καταλύτη και επιταχυντή τοποθετείται επάνω στο *Gel Coat* μέσω πινέλου ή με πιστόλι ψεκασμού. Έπειτα, είτε υπό μορφή υαλοϋφάσματος είτε σε μορφή υαλοπλήματος ή συνδυασμού των δύο, τοποθετούνται ρολά με μέγιστο μήκος συνήθως 1 έως 1.5 m στην υγρή ρητίνη η οποία και θα πρέπει να τα διαβρέξει πλήρως. Σε περίπτωση που το πλάτος των ρολών δεν είναι μικρότερο από το επιθυμητό μπορεί ο κατασκευαστής να προβεί στην τοποθέτηση του ενός δίπλα στο άλλο με μερική επικάλυψη των στρώσεων. Οι τυχόν επικαλύψεις θα πρέπει να ελέγχονται με προσοχή γιατί ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη τοπική αύξηση πάχους. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εύκολα μπορεί να τοποθετηθούν συγκεκριμένοι τύποι υφασμάτων σε συγκεκριμένες θέσεις έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη βελτιστοποίηση με μικρότερο οικονομικό κόστος υλικών. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή απαιτεί αρκετό χρόνο εργασίας αλλά δίνει ποιοτικότερο αποτέλεσμα. Κατά την μέθοδο εφαρμογής με το χέρι το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται εξολοκλήρου από τον τεχνίτη ο οποίος θα πραγματοποιήσει την διαδικασία. Ο τεχνίτης σε αυτήν την περίπτωση είναι υπεύθυνος για την τοποθέτηση των ινών με τον σωστό προσανατολισμό τον πλήρη εμποτισμό τους αλλά και την αποφυγή εγκλωβισμένου αέρα. Στη μέθοδο αυτή ο αέρας συχνά εγκλωβίζεται δημιουργώντας σφαιρικούς θυλάκες οι οποίοι όμως λόγω του σχήματος τους έχουν μικρότερο μηχανικό αντίκτυπο, δίχως όμως αυτό να τις καθιστά άνευ σημασίας κατασκευαστικές ατέλειες. Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός μη δυνατότητας τοποθέτησης πολλών στρώσεων λόγω ελλιπούς διάβροχης. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα έχει δοθεί με την χρήση προεμποτισμένων (*pre-preg*) υφασμάτων.

Ορισμένα ναυπηγεία έχουν τη δυνατότητα χρήσης ειδικών μηχανήματων εμποτισμού τα οποία συνήθως τοποθετούνται πάνω από το καλούπι με αποτέλεσμα να πετυχαίνουν καλύτερο και πιο γρήγορο εμποτισμό από ότι θα πραγματοποιούσε ένας άνθρωπος. Όμως χρειάζεται προσοχή γιατί ενδέχεται να χαλαρώσει ο προσανατολισμός των ινών.

Μορφοποίηση με πίεση: Η μέθοδος μορφοποίησης με πίεση (*Compression Moulding*) πραγματοποιείται συνήθως με την άσκηση πίεσης σε συνδυασμό με θέρμανση στην επιφάνεια του πολύστρωτου πριν ακόμα αυτό πολυμεριστεί πλήρως, με σκοπό την μείωση του ποσοστού των κενών που δημιουργούνται από την παρουσία αέρα. Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα που προκύπτει από την χρήση αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός πως απομακρύνεται τυχόν περίσσεια ρητίνης με αποτέλεσμα ελαφρύτερα προϊόντα. Η χρήση της θερμότητας έχει ως σκοπό τον πιο γρήγορο πολυμερισμό του πολύστρωτου.

Οι δύο πιο συνηθισμένες μέθοδοι κατεργασίας οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρότερου μεγέθους σκάφη αλλά και άλλων εξαρτημάτων ή αντικειμένων που συναντώνται στην ναυπηγική ακολουθώντας την μέθοδο μορφοποίησης με πίεση είναι:

Μορφοποίηση με σάκο κενού (*Vacuum Bag Moulding*): Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια εξέλιξη της μεθόδου μορφοποίησης με επαφή. Επάνω από το μη στερεοποιημένο πολύστρωτο τοποθετείται ειδική μεμβράνη - σάκος ο οποίος στεγανοποιείται ολοκληρωτικά στα άκρα και στην συνέχεια πραγματοποιείται αναρρόφηση του περιεχομένου αέρα με την τελική πίεση στο εσωτερικό του σάκου να μειώνεται μέχρι 1 bar. Παραλλαγή της παραπάνω διαδικασίας αποτελεί η περίπτωση που αντί να πραγματοποιείται αναρρόφηση του αέρα κάτω από την ειδική μεμβράνη ασκείται πίεση στο περιβάλλον πάνω από αυτή. Θα πρέπει να αναφερθεί πως και σε αυτήν την μέθοδο μορφοποίησης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί θερμότητα για την επιτάχυνση της διαδικασίας.

Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η κατασκευή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, δεδομένου ότι μπορεί να οδηγήσει σε επηρεασμό της μήτρας με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί ακόμα και καύση, ενώ αν είναι πολύ χαμηλότερη, να παρατηρηθεί

μη ολική σκλήρυνση. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σάκος με κενό αέρος το εκάστοτε ναυπηγείο θα πρέπει να βρίσκει λύσεις που να εξασφαλίζουν την σωστή θερμοκρασία σκλήρυνσης της μήτρας. Αυτό το γεγονός έχει οδηγήσει πολλά ναυπηγεία στο να πραγματοποιήσουν χρήση της τεχνικής εναπόθεσης με το χέρι στη γάστρα του πλοίου και να περιορίζουν την χρήση σάκου κενού αέρος για το κατάστρωμα και τις υπερκατασκευές.

Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (*Autoclave Moulding*): Στη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται χρήση θαλάμου ο οποίος λειτουργεί ως φούρνος αλλά και ως δοχείο πίεσης ταυτόχρονα. Οι πιέσεις μπορούν να κυμανθούν από 5 με 15 *bar* επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ίνες ενίσχυσης, αλλά και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες.

Μέθοδος περιέλιξης ινών: Με την μέθοδο της περιέλιξης ινών (*Filament Winding*) δίνεται η δυνατότητα κατασκευής εκ περιστροφής συμμετρικών κατασκευών με αρκετά υψηλή ποιότητα. Στην ναυπηγική, η χρήση αυτής της μεθόδου εστιάζεται κυρίως σε κατασκευή αγωγών, σωληνώσεων, δεξαμενών αλλά και σε γάστρες πίεσης υψηλών απαιτήσεων όπως αυτές των υποβρύχιων κατασκευών.

Η διαδικασία που ακολουθείται ξεκινάει με την χρήση συνεχών πλέξεων νήματος (*Roving*) οι οποίες δημιουργούν μια ζώνη (λωρίδα) ινών και τυλίγονται σε ένα αξονικό καλούπι (*Mandrel*) το οποίο είναι αυτό που θα καθορίσει και την εσωτερική γεωμετρία της κατασκευής. Ο εμποτισμός των λωρίδων μπορεί να γίνει από πριν (*Dry-Winding*) με μερικώς στερεοποιημένη ρητίνη είτε μετά, αφότου τυλιχτούν στο καλούπι (*Wet-Winding*). Υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμίζεται η θέση στην οποία τυλίγονται οι ίνες πάνω στο καλούπι δίνοντας έτσι την ευχέρεια μεγαλύτερης σχεδιαστικής ελευθερίας. Τα καλούπια συνηθίζεται να είναι χαλύβδινα ενώ μπορεί να είναι διαιρετά ή να έχουν μια μικρή κωνικότητα. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο μειωμένος απαιτούμενος χρόνος παραγωγής αλλά και η δημιουργία προϊόντων υψηλής ποιότητας.

Μέθοδος έγχυσης της ρητίνης (*Infusion*): Ο συνήθης τρόπος εφαρμογής της μεθόδου αυτής περιλαμβάνει τη χρήση δύο καλουπιών, ενός αρσενικού και ενός

θηλυκού μέσα στα οποία τοποθετούνται οι ενισχυτικές ίνες σε ξηρή μορφή. Τα καλούπια όταν ενωθούν θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον δυο οπές, ώστε από τη μια να διοχετευτεί με πίεση η ρητίνη ενώ η άλλη θα λειτουργήσει ως έξοδος. Η διαφορά πίεσης που έχουν η είσοδος στο καλούπι με την έξοδο είναι αυτή που οδηγεί την ρητίνη ώστε να διαβρέξει όλη την επιφάνεια των ενισχυτικών. Πρέπει να τονιστεί πως η σωστή τοποθέτηση των οπών είναι καθοριστική για το τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει κατασκευές υψηλών απαιτήσεων με λίγες επιφάνειες. Αξίζει να αναφερθεί πως με αυτήν την μέθοδο επιτυγχάνεται αισθητή μείωση των αναθυμιάσεων που εκλύονται κατά των πολυμερισμό της ρητίνης. Για να υπάρξει μείωση του χρόνου εμποτισμού είναι αναγκαίο να υπάρχουν υψηλές πιέσεις, λαμβάνοντας υπόψη το ενδεχόμενο αλλοίωσης του προσανατολισμού των ινών καθώς και πιθανής αστοχίας του καλουπιού. Για την αποφυγή εισροής αέρα μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού ανάμεσα στα δύο κομμάτια αυτού τοποθετείται ένα περιφερειακό κανάλι με την ονομασία στεγανοποιητική στεφάνη (*Closing Rim*). Έχοντας πάντα πίεση μικρότερη από αυτήν της κοιλότητας του καλουπιού εμποδίζεται η διαρροή αέρα σε αυτό.

2.5 Πρότυπα και οδηγίες νηογνώνων

Ορισμένα βασικά στοιχεία και αρχές από τους κανονισμούς επιλεγμένων νηογνώνων που αφορούν την κατασκευή σκαφών και εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά εξετάζονται στη συνέχεια. Οι νηογνώμονες που αναφέρονται παρακάτω είναι ο Γαλλικός (*Bureau Veritas*) [5], ο οποίος ιδρύθηκε το 1828, ο Αγγλικός (*Lloyds*) [15], ο οποίος ιδρύθηκε το 1695, και ο *DNV-GL* [16], που δημιουργήθηκε από την συγχώνευση του Γερμανικού με τον Νορβηγικό νηογνώμονα [17]. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα στοιχεία που εξετάστηκαν από τους τρεις διαφορετικούς νηογνώμονες παρατηρήθηκαν ομοιότητες στις προσεγγίσεις που ακολουθούνται. Ο εκάστοτε νηογνώμονας έχει την δικαιοδοσία να τροποποιεί τους κανονισμούς που έχει δημιουργήσει οποτεδήποτε το κρίνει απαραίτητο.

2.5.1 Νηογνώμονας *Bureau Veritas*

Οι παρακάτω οδηγίες προέρχονται από τον κανονισμό *NR 546 DT RO2* του νηογνώμονα που δημοσιεύθηκε το Νοέμβριο του 2018 με τίτλο “*Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey*” [5]. Αποτελούνται από 11 ενότητες και 1 παράρτημα. Ο κανονισμός αναφέρεται σε πλοία-σκάφη τα οποία έχουν ολόκληρη τη γάστρα ή μέρος αυτής κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά ή κοντραπλακέ θαλάσσης (*plywood*). Ο εξεταζόμενος κανονισμός αλληλοσυμπληρώνεται με άλλους υφιστάμενους όπως είναι ο *NR 590* και *NR 663*, καθώς και με τους κανονισμούς *NR 600*, *NR 566* και *NR 500* που αναφέρονται σε υποδιαιρέσεις, διαμερίσματα και διάταξη των ανοιγμάτων του κύτους. Όσον αφορά πλοία ειδικού σκοπού, ειδικής σχεδίασης, υψηλών ταχυτήτων καθώς και αυτά τα οποία δεν είναι κατασκευασμένα από υλικά που αναφέρονται στους προαναφερθέντες κανονισμούς (*NR-546*) θα πρέπει να πραγματοποιείται ειδική μελέτη από το νηογνώμονα. Κατά τη διαδικασία κατασκευής πραγματοποιούνται έλεγχοι από τον νηογνώμονα, όχι μόνο στην κατασκευή αλλά και στα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται, τα οποία πρέπει να έχουν πιστοποιηθεί πριν χρησιμοποιηθούν όπως περιγράφεται παρακάτω.

Διαδικασία κατασκευής γάστρας

Ο νηογνώμονας ορίζει βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθούνται κατά την κατασκευή της γάστρας. Αυτά είναι:

- Έλεγχος και πιστοποίηση των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή.
- Υπολογισμός των θεωρητικών μηχανικών χαρακτηριστικών που θα έχουν τα πολύστρωτα ή οι στρώσεις, συμφωνά με τους τύπους που ορίζονται στην ενότητα 5 και 6 για τα πάνελ αλλά και για βασικά στοιχεία της γάστρας όπως είναι τα ενισχυτικά (*NR-546*).
- Πραγματοποίηση πειραματικών ελέγχων σχετικών με την ορθότητα των θεωρητικών αποτελεσμάτων.
- Σχεδιασμός, προγραμματισμός και οργάνωση της κατασκευαστικής πορείας.

- Προκαταρκτικός έλεγχος του χώρου κατασκευής και ενδιάμεσοι έλεγχοι κατά την διάρκεια της εργασίας όπως ορίζεται στην ενότητα 11 (NR-546).

Τα σύνθετα υλικά που εξετάζει ο κανονισμός είναι αυτά τα οποία αποτελούνται από θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, ίνες από γυαλί, άνθρακα και αραμίδιο, με τρόπο κατασκευής τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (*hand lay-up*), τη μέθοδο έγχυσης υπό κενό (*Infusion*) και τη μέθοδο των προ-εμποτισμένων υφασμάτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι και υλικά, μετά από έγκριση του νηογνώμονα. Στους κανονισμούς του νηογνώμονα η αντοχή των δοκών - ενισχυτικών εξετάζεται ξεχωριστά από τις προκύπτουσες τοπικές φορτίσεις.

Κατά τον έλεγχο πάνελ στην περίπτωση λυγισμού, τα οποία είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, χρησιμοποιούνται καθορισμένα φορτία που ορίζονται από επιμέρους κανονισμούς, ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται απαραίτητα υπόψη δύο περιπτώσεις:

- 1) Το πάνελ να έχει υποβληθεί σε συμπίεση.
- 2) Το πάνελ να έχει υποβληθεί σε ψαλιδισμό.

Τα πάνελ που θα πρέπει να ελέγχονται σε ένα σκάφος σύμφωνα με τον νηογνώμονα εξαιτίας της επίδρασης του φαινομένου του λυγισμού είναι κυρίως τα ακόλουθα:

- 1) Αυτά στα οποία ασκείται συμπίεση εξαιτίας διαμηκών δυνάμεων (γάστρες μονόγαστρων σκαφών και πλωτήρες καταμαράν). Συγκεκριμένα τα πάνελ του πυθμένα αλλά και του καταστρώματος, καθώς και τα πλευρικά πάνελ της γάστρας, κυρίως κοντά στο κατάστρωμα και στον πυθμένα.
- 2) Τα πάνελ που δέχονται συμπίεση από εγκάρσιες φορτίσεις κάμψης στις περιπτώσεις των καταμαράν, στα οποία συνηθίζεται να παρατηρείται ταυτόχρονα παρουσία στρεπτικών δυνάμεων εξαιτίας της ιδιομορφίας της κατασκευής.
- 3) Τα πάνελ που δέχονται δυνάμεις ψαλιδισμού.

Οι κανονισμοί προβλέπουν ελάχιστα κριτήρια αστοχίας για κύρια και δευτερεύοντα ενισχυτικά, όπως επίσης και για τις περιπτώσεις που

πραγματοποιείται χρήση συγκολλητικών ουσιών για την δημιουργία ενώσεων μεταξύ των στοιχείων της κατασκευής.

Βασικά έγγραφα που θα πρέπει να παραδοθούν

Τα σχέδια καθώς και όλα τα υπόλοιπα έγγραφα που θα πρέπει να παραδοθούν ορίζονται από τους κανόνες «*Rules for the classification of ships*» [5] του νηογνώμονα και πιο συγκεκριμένα περιγράφονται στην παράγραφο 1.1.2 του κανονισμού. Λόγω της χρήσης σύνθετων υλικών είναι απαραίτητη η έκδοση επιπρόσθετων σχεδίων και εγγράφων αλλά και η συμπλήρωση στοιχείων σε υφιστάμενα. Όσον αφορά τα πολύστρωτα θα πρέπει τα σχέδια να περιλαμβάνουν επίσης:

- Βασικά στοιχεία του πολύστρωτου, όπως το πάχος, τη περιεκτικότητα κάθε στρώσης σε κάθε συστατικό, τα χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης (π.χ. αν είναι μονής κατεύθυνσης).
- Τη διεύθυνση του πολύστρωτου σε σχέση με τη διεύθυνση της συνολικής κατασκευής τους σκάφους.
- Τους τρόπους σύνδεσης των πολύστρωτων με αλλά κατασκευαστικά στοιχεία του σκάφους.

Όσον αφορά την κάθε στρώση θα πρέπει να αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχει δώσει ο προμηθευτής αυτών, με επισήμανση του τύπου του υφάσματος, την επωνυμία, την αναφορά στο υλικό της μήτρας καθώς και του *Gel Coat*, των ενισχύσεων και του υλικού που ενδέχεται να χρησιμοποιείται ως πυρήνας.

Σε κάθε τύπο γάστρας, τρόπο κατασκευής, πείραμα και έλεγχο θα πρέπει στο τελικό έγγραφο που θα κατατεθεί να αναφέρονται οι παρακάτω πληροφορίες:

- Σχετικά με τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν: δηλώνονται όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται με λεπτομέρειες, πληροφορίες σχετικά με αυτά κατά την παραλαβή, αναφορά στις διαδικασίες που ακολουθούνται από την παραλαβή μέχρι την χρήση των υλικών αυτών.
- Τρόπος ετοιμασίας των υλικών.

- Σχετικά με τα καλούπια που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν: τύπος καλουπιού, τρόπος προετοιμασίας, αποκλίσεις διαστάσεων που μπορεί να εμφανίζονται μεταξύ καλουπιού και πρωτοτύπου.
- Διαδικασία κατασκευής: τρόπος εφαρμογής του *Gel Coat*, διαδικασία εναπόθεσης υλικών.
- Τρόπος κατασκευής γάστρας.
- Τρόπος σύνδεσης γάστρας με το κατάστρωμα.
- Τρόποι εγκατάστασης κατασκευαστικών στοιχείων.
- Δοκιμαστικά πάνελ από όλα τα στάδια κατασκευής για εργαστηριακούς ελέγχους.
- Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος, το ναυπηγείο υποχρεώνεται από τον νηογνώμονα να του παραδώσει λεπτομερή στοιχεία για τις συνθήκες αποθήκευσης των υλικών (θερμοκρασία, υγρασία κτλ.) καθώς και τις ημερομηνίες καταχώρησης και εκκίνησης της κατασκευαστικής διαδικασίας. Όλα τα στάδια κατασκευής θα πρέπει να καταγράφονται με λεπτομέρειες και το κάθε έγγραφο θα πρέπει να αποστέλλεται στο νηογνώμονα.

Αναλύσεις αστοχίας

Οι αναλύσεις των πάνελ και των ενισχυτικών, κυρίων ή δευτερευόντων, θα πρέπει να πραγματοποιούνται σύμφωνα με τον νηογνώμονα με βάση τα παρακάτω στάδια:

- Καθορισμός και μελέτη των τοπικών φορτίων.
- Χρήση κανονισμών ανάλυσης καθώς και επιμέρους κανονισμών.
- Καθορισμός ελάχιστου κριτηρίου ασφαλείας.

Μεγάλη προσοχή δίνεται στην κατασκευαστική συνέχεια των στοιχείων της συνολικής κατασκευής του πλοίου, δεδομένου ότι σε περίπτωση διαμήκους ενίσχυσης θα πρέπει τα αντίστοιχα ενισχυτικά να έχουν παρόμοια συμπεριφορά σε όλο το μήκος τους. Επίσης τα δευτερεύοντα ενισχυτικά απαιτείται να παρουσιάζουν συνέχεια μηχανικών ιδιοτήτων στα σημεία που διασταυρώνονται με τα κύρια. Σε

περίπτωση εμφάνισης μηχανικής ασυνέχειας συστήνεται περαιτέρω ενίσχυση της περιοχής.

Τα ανοίγματα και η παρουσία κάθετων ακμών θα πρέπει να περιορίζονται στο ελάχιστο απαραίτητο βαθμό ώστε να αποφεύγεται η τοπική παρουσία συγκέντρωσης τάσεων. Για το λόγο αυτό συστήνεται να πραγματοποιείται επιμέρους μελέτη με σκοπό τον προσδιορισμό και περιορισμό των ανοιγμάτων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή.

Τα φορτία που μπορεί να εμφανίζονται σε ένα σκάφος σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5] μπορεί να είναι:

- Τοπικά φορτία (*local loads*): υδροστατική πίεση και εσωτερικά φορτία ανάμεσα στα όποια εξαιρούνται η κατάσταση εισροής ύδατος από την θάλασσα.
- Φορτία που ασκούνται στο σύνολο της κατασκευής (*global loads*):
 - για μονόγαστρα: δυνάμεις της θάλασσας όπως ορίζονται από το κεφάλαιο 3.2.1 των κανονισμών με κατάσταση θάλασσας «*Head sea*»
 - για πολύγαστρα σκάφη: κατάσταση ήρεμης θάλασσας με φορτίο από κυματισμό.

Τα τοπικά φορτία τα οποία λαμβάνονται υπόψη στις μηχανικές αναλύσεις κατά τη διάρκεια της σχεδίασης καθορίζονται από τους γενικούς κανονισμούς του νηογνώμονα στο κεφάλαιο 1 του αντίστοιχου κανονισμού. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω οι βασικοί τύποι τοπικών φορτίων που λαμβάνονται υπόψη:

- 1) Υδροστατικές πιέσεις, είτε από το περιβάλλον είτε από ενδεχόμενη παρουσία δεξαμενών.
- 2) Δυναμικές φορτίσεις από την θάλασσα όπως είναι η επίδραση των κυματισμών.
- 3) Φορτίσεις από τοπικά στοιχεία στην κατασκευή, όπως είναι τυχόν φορτία (*cargo*) και μηχανήματα (*machinery*).
- 4) Φορτίσεις στο κατάστρωμα οι οποίες μπορεί να προέρχονται από τη θάλασσα, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως είναι οχήματα και άλλα αντικείμενα.

Κριτήρια αστοχίας και ασφάλειας

Τα κριτήρια αστοχίας που ορίζει ο κανονισμός περιγράφονται στην ενότητα 1 και από τα κριτήρια ασφαλείας (NR 546). Τα κριτήρια ασφαλείας ορίζονται από την αναλογία ανάμεσα:

- στη θεωρητική τάση θραύσης της κάθε στρώσης του πολύστρωτου, ή όταν αυτό δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί, από την θεωρητική τάση θραύσης του συνολικού πολύστρωτου, και
- στην πραγματική εφαρμοζόμενη τάση που ασκείται είτε από τοπικά φορτία (*local loads*) είτε στο σύνολο της κατασκευής (*global loads*).

Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας καθορίζονται από τη σχέση που έχουν με τους μερικούς συντελεστές ασφαλείας, οι οποίοι είναι:

- C_N : Μερικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψιν του το αποτέλεσμα της «γήρανσης» των πολύστρωτων.
- C_F : Μερικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψιν του τη διαδικασία κατασκευής του υφάσματος και την παραγωγική ικανότητα του. Συνδέεται άμεσα με τις μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου.
- C_R : Μερικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τον τύπο και την διεύθυνση της κύριας επιβαλλόμενης τάσης στις ίνες του ενισχυτικού υφάσματος που έχει το πολύστρωτο.
- C_S : Μερικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τον συνδυασμό των τάσεων κάθε μεμονωμένης στρώσης του πολύστρωτου.
- C_I : Μερικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη όλους τους τύπους των εν δυνάμει φορτίων (υδροστατική πίεση, δυναμική υδροστατική πίεση, εσωτερικές πιέσεις).
- C_{Buck} : Μερικός συντελεστής ασφαλείας για την περίπτωση λυγισμού σε πολύστρωτα πάνελ.

Ο κύριος συντελεστής ασφάλειας μεμονωμένων στρώσεων ενός πολύστρωτου συμβολίζεται με τα γράμματα SF ενώ θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$SF \geq C_V C_F C_R C_i \quad (2.49)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας λόγω τάσεων που οδηγούν σε λυγισμό του συνολικού πολύστρωτου, είτε αυτό είναι μεμονωμένο πάνελ είτε ενισχυτικό, συμβολίζεται με SF_B , ενώ θα πρέπει για αυτόν να ισχύει η σχέση:

$$SF_B \geq C_{Buck} C_F C_V C_i \quad (2.50)$$

Στην περίπτωση τάσεων ψαλιδισμού σε κατασκευές που έχουν κολληθεί μεταξύ τους, θα πρέπει ο συντελεστής ασφαλείας να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$SF \geq 2.4 C_F C_i \quad (2.51)$$

Χαρακτηριστικά εγκάρσιων ενισχυτικών

Όσον αφορά τα ενισχυτικά, η μεθοδολογία που ακολουθείται από το νηογνώμονα περιλαμβάνει:

- Ανάλυση παραμόρφωσης κάθε στοιχείου.
- Έλεγχο τάσεων και παραμορφώσεων.
- Έλεγχο των συντελεστών ασφάλειας.
- Έλεγχο κάμψης, αν αυτό είναι εφικτό.

Το πάχος των εγκάρσιων ενισχυτικών εκτιμάται από τον παρακάτω τύπο με βάση το *Young Modulus* του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί:

$$t_{ref} = t \frac{E_i}{E_{ref}} \quad (2.52)$$

Όπου

t : Πραγματικό πάχος του στοιχείου (σε mm).

E_i : Το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας (*Young modulus*) του στοιχείου σε (N/mm^2).

E_{ref} : Τιμή αναφοράς του μέτρου ελαστικότητας (*Young modulus*) σε N/mm^2 όπως ορίζεται από τους κανονισμούς.

Το *Section Modulus* Z_{Aref} σε κάθε εγκάρσιο τμήμα της γάστρας (μετριέται σε m^3) και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Z_{Aref} = \frac{I_{Yref}}{|z-N|} \quad (2.53)$$

όπου

I_{Yref} : Ροπή αδράνειας.

z : Μοχλοβραχίονας επαναφοράς από την *Base Line*.

N : Μοχλοβραχίονας από το κέντρο βάρους.

Το *Section Modulus* σε πυθμένα και κατάστρωμα δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

- Για πυθμένα:

$$Z_{ABref} = \frac{I_{Yref}}{N} \quad (2.54)$$

- Για κατάστρωμα:

$$Z_{ADref} = \frac{I_{Yref}}{v_D} \quad (2.55)$$

Ροπή αδράνειας για μέσο νομέα:

$$\frac{M_v 10^{-3} L_{WL}^2}{10 E_{ref} I_{Yref}} \leq 0.003 L_{WL} \quad (2.56)$$

Σε περίπτωση πολύγαστρου σκάφους, όπως είναι τα καταμαράν ο τρόπος προσέγγισης για τον υπολογισμό αντοχής των κανονισμών είναι ο παρακάτω:

- Μελέτη για κατάσταση θάλασσας «*Head sea*», σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ορίζεται στο άρθρο 4 του σχετικού κανονισμού. Η ροπή αδράνειας I_{ref} θα πρέπει να υπολογίζεται για κάθε πλωτήρα. Οι ενδιάμεσες πλατφόρμες σε περίπτωση που ξεπερνούν το $0.4L$ θα πρέπει να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς της ροπής αδράνειας I_{ref} .
- Μελέτη σε άλλες καταστάσεις θάλασσας όπως ορίζεται στο άρθρο 5.2

Σε περίπτωση που θεωρηθεί απαραίτητο από τον νηογνώμονα, η γάστρα θα πρέπει να ελεγχθεί σε συνδυασμό με τοπικά φορτία και δυνάμεις, καθώς και μια συνολική προσέγγιση δυνάμεων που ασκούνται σε όλο το σκάφος.

Ως γενικές οδηγίες, ο νηογνώμονας ορίζει πως σε πολύγαστρα σκάφη θα πρέπει να υπάρχει συνέχεια των μηχανικών ιδιοτήτων σε όλο το μήκος των εγκάρσιων ενισχυτικών της πλατφόρμας καθώς και να γίνεται χρήση των αρχών που ορίζει το κεφάλαιο 2.1.

Ο κανονισμός, για να μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος ποιότητας, θεωρεί τις παρακάτω παραδοχές:

- Φλάντζες, τα δίκτυα (*web*) και οι κολλημένες σε αυτά δοκοί θεωρούνται ομογενή υλικά.
- Στην περίπτωση καμπτικών δυνάμεων στα ενισχυτικά, οι τοπικές παραμορφώσεις των φλαντζών και των κολλημένων σε αυτές δοκών θεωρούνται ομοιόμορφες σε όλο το πάχος τους.

Πίνακας 2.1. Μεθοδολογία που ακολουθεί ο νηογνώμονας για τη μελέτη των ενισχυτικών [5].

Βήματα	Περιγραφή	Αναφορά σε ενότητες του κανονισμού (NR-546):
1	Υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, της ακαμψίας και των θεωρητικών τάσεων θραύσης κάθε επιμέρους στρώσης των πολύστρωτων των βασικών στοιχείων στους τοπικούς ορθοτροπικούς άξονες τους.	Ενότητα 5
2	Γεωμετρικό προσδιορισμό του πολύστρωτου σε κάθε βασικό στοιχείο, με βάση:	Ενότητα 6, [2.1.2] και Ενότητα 6, [2.1.3]
	<ul style="list-style-type: none"> • Τη θέση όλων των επιμέρους στρωμάτων. • Τον προσανατολισμό της κάθε επιμέρους στρώσης σε συνάρτηση με τον διαμήκη άξονα του ενισχυτικού. 	

3	Υπολογισμοί, για κάθε βασικό στοιχείο, των συντελεστών ελαστικότητας και των μηχανικών χαρακτηριστικών του πολύστρωτου στη διεύθυνση του ενισχυτικού.	Ενότητα 6, [2.2]
4	Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του ενισχυτικού.	[2.2]
5	Για ενισχυτικά που δέχονται τοπικά φορτία: <ul style="list-style-type: none"> • Υπολογισμός της ροπής κάμψης M και της δύναμης διάτμησης T. 	[4] και [3.1.1]
	<ul style="list-style-type: none"> • Υπολογισμός των τάσεων σε κάθε επιμέρους στρώση του πολύστρωτου, κάθε επιμέρους στοιχείου κατά μήκος του διαμήκη άξονα του ενισχυτικού, που προκαλούνται από την ροπή κάμψης M και την δύναμη διάτμησης T. 	
6	Για ενισχυτικά που συμμετέχουν στην συνολική αντοχή της κατασκευής (<i>global loads</i>):	Ενότητα 2, [4.2.1] και [3.2.1] και [3.2.2]
	<ul style="list-style-type: none"> • Υπολογισμός της συνολικής εγκάρσιας τάσης που δέχεται το ενισχυτικό. 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Υπολογισμός των τάσεων που δέχεται κάθε επιμέρους στρώση του πολύστρωτου κάθε στοιχείου, κατά μήκος του διαμήκη άξονα του ενισχυτικού, αλλά και των τοπικών αξόνων. • Υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού. 	
7	Για περίπτωση ενισχυτικών που δέχονται τοπικά φορτία αλλά και συμμετέχουν στην συνολική αντοχή της κατασκευής: <ul style="list-style-type: none"> • Υπολογισμός των τάσεων που προκύπτουν από το συνδυασμό των φορτίσεων σε κάθε επιμέρους στρώση του πολύστρωτου σε κάθε στοιχείο. 	[6]
8	Έλεγχος πληρότητας των κριτηρίων ασφαλείας σε περίπτωση τοπικών φορτίσεων και <i>global loads</i> , εάν αυτό είναι εφικτό.	[4.1.3] και [5.1.2] και [6]

Πρότυπα πειραματικών ελέγχων δοκιμών και υλικών

Το ναυπηγείο είναι αυτό που φέρει την ευθύνη για την διεξαγωγή μηχανικών, φυσικών και χημικών δοκιμασιών. Τα αποτελέσματα θα πρέπει να συγκρίνονται με τις εκτιμώμενες τιμές που προκύπτουν κατόπιν υπολογισμών, αλλά και με τα ελάχιστα πρότυπα (*standards*) που ορίζει ο νηογνώμονας.

Συνηθίζεται να λαμβάνονται για δοκιμή, πάνελ από τον πυθμένα της γάστρας καθώς και από τα πλάγια αυτής σε περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί χρήση διαφορετικών υλικών. Τα πειράματα επιβάλλεται να διεξάγονται στα εργαστήρια του νηογνώμονα είτε σε άλλο πιστοποιημένο από αυτόν εργαστήριο.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 2.2 που ορίζει βασικά πρότυπα του νηογνώμονα που θα πρέπει να ακολουθούνται σε περίπτωση μηχανικών πειραμάτων – ελέγχων των υλικών:

Πίνακας 2.2. Πρότυπα που θέτει ο νηογνώμονας για τις μηχανικές δοκιμές και έλεγχο των υλικών τύπου πάνελ [5].

Πάνελ	Είδος δοκιμασίας (πρότυπα)	Ποσότητα δοκιμών	Διαστάσεις δοκιμών (mm) ^{1,2}
Αμιγές υλικό (<i>monolithic</i>)	Δοκιμασία εφελκυσμού (ISO 527)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 σε διαμήκη διεύθυνση του πάνελ • 5 σε εγκάρσια διεύθυνση του πάνελ • 2 δοκιμαστικά δοκίμια για βαθμονόμηση⁷ 	Μήκος: 400, πλάτος ως ακολούθως: <ul style="list-style-type: none"> • 25 όπου $e < 25$ • 30 όπου $25 < e < 30$ • 35 όπου $30 < e < 35$, κτλ.
	Δοκιμασία κάμψης 3 σημείων (ISO 14125)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 σε διαμήκη διεύθυνση του πάνελ • 5 σε εγκάρσια διεύθυνση του πάνελ • 2 δοκιμαστικά δοκίμια για βαθμονόμηση⁷ 	Μήκος : 200, πλάτος ως ακολούθως: <ul style="list-style-type: none"> • 25 όπου $e < 25$ • 30 όπου $25 < e < 30$ • 35 όπου $30 < e < 35$, κτλ.
	Προσδιορισμός πυκνότητας (ISO 1183) Περιεκτικότητα ενίσχυσης κατά βάρος: (ISO 1172) ³	4 Δείγματα - δοκίμια	30 x 30

Sandwich	Δοκιμασία κάμψης 3 σημείων: (ISO 14125) ⁶	<ul style="list-style-type: none"> • 5 σε διαμήκη διεύθυνση του πάνελ • 5 σε εγκάρσια διεύθυνση του πάνελ • 2 δοκιμαστικά δοκίμια για βαθμονόμηση⁷ 	<p>Μήκος: 1000⁵</p> <p>Πλάτος: 2 - e</p>
	Για όλες τις ενισχύσεις: Δοκιμασία εφελκυσμού (ISO 527, ή αντίστοιχο) ⁴	<ul style="list-style-type: none"> • 5 σε διαμήκη διεύθυνση του πάνελ • 5 σε εγκάρσια διεύθυνση του πάνελ • 2 δοκιμαστικά δοκίμια για βαθμονόμηση⁷ 	<p>Μήκος: 400, πλάτος ως ακολούθως:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 25 όπου $e < 25$ • 30 όπου $25 < e < 30$ • 35 όπου $30 < e < 35$, κτλ.
	Για όλες τις ενισχύσεις: Μέτρηση πυκνότητας: (ISO 1183) Περιεκτικότητα ενίσχυσης κατά βάρος: (ISO 1172) ³	Δείγματα - δοκίμια	30 x 30

¹ Ο νηογνώμονας ενδέχεται να ζητήσει παραπάνω τεστ με διαφορετικές διαστάσεις δοκιμίων.

² e : Πάχος, σε mm, του δοκιμίου υπό εξέταση.

³ Για πολυστρωτα πάνελ που είναι υπό εξέταση και έχουν ενισχύσεις από ίνες άνθρακα ή/και *para-aramid* το πρότυπο *ASTM-D3171* θα πρέπει να ακολουθείται.

⁴ Στην περίπτωση που και από τις δυο πλευρές του Sandwich οι επιστρώσεις είναι από το ίδιο υλικό, τα τεστ εφελκυσμού και πυκνότητας μπορούν να γίνουν μόνο από την μια πλευρά.

⁵ Η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης (*fixed rollers*) δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 600 mm (συστήνεται να χρησιμοποιείται μια τιμή γύρω στα 800 mm)

⁶ βλ. [4.2.3] c) (στο NR-546)

⁷ Για ορθοτροπικό πάνελ, τα τεστ μπορούν να γίνουν μόνο στη μια κατεύθυνση αυτού.

Στην προσπάθεια να καθιερωθεί μια ομοιογένεια στα πρωτεύοντα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σκαφών, ο νηογνώμονας υποβάλει σε συνεργασία με τον κατασκευαστή τα εν λόγω υλικά σε δοκιμές, με σκοπό να πιστοποιηθεί ότι αυτά πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις. Στον αμέσως παρακάτω

πίνακα 2.3 αναφέρονται οι δοκιμές στις οποίες θα πρέπει να επιβληθούν τα υλικά σύμφωνα με τον νηογνώμονα:

Πίνακας 2.3. Δοκιμές που θα πρέπει να επιβληθούν τα υλικά σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5].

ΑΡΧΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ / ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ/ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Πολυεστερικής βάσης <i>Gel coat</i> (πλήρως πολυμερισμό)	Εφελκυσμός: <ul style="list-style-type: none"> • Young's Modulus (N/mm²) • παραμόρφωση στη θραύση (%) 	≥ 3000 ≥ 2,5	ISO 527 ή αντίστοιχο ²
	Απορρόφηση νερού (mg) σε 28 ή περισσότερες μέρες	≤ 80	ISO 62 μέθοδος 1 ή αντίστοιχο ³
Ρητίνες	πυκνότητα	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 1%	ISO 1183 ή αντίστοιχο
	Εφελκυσμός: <ul style="list-style-type: none"> • Modulus (N/mm²) • όριο παραμόρφωσης (%) 	≥ 85% από τις τιμές που δίνονται στο κεφάλαιο 4, Πίνακας 1 (NR-546)	ISO 527 ή αντίστοιχο ²
	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης	≥ Ονομαστικής τιμής του κατασκευαστή	ISO 11357 ή αντίστοιχο
Συγκολλητικά υλικά ^{11, 12}	Εφελκυσμός: <ul style="list-style-type: none"> • Modulus (N/mm²) • όριο παραμόρφωσης (%) 	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 10%	ISO 527 ASTM D 638
	Διάτμηση: <ul style="list-style-type: none"> • Modulus (N/mm²) • όριο παραμόρφωσης (%) 	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 10%	ISO 11003-2 ASTM D 3983 NF EN 14869-2
	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης	≥ Ονομαστικής τιμής του κατασκευαστή	ISO 11357 ή αντίστοιχο

Νήμα	Βάρος ανά μονάδα μήκους (<i>tex</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/-10%	ISO 1889 ή αντίστοιχο ⁴
Chopped strand mat	Βάρος ανά μονάδα επιφανείας (<i>g/m²</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/-10%	ISO 3374 ή αντίστοιχο ⁵
	Έλεγχος εφελκυσμού σε πολύστρωτο: • <i>Modulus (N/mm²)</i> • όριο παραμόρφωσης (%)	σύμφωνα με τους κανονισμούς	ISO 3268 ή αντίστοιχο
Woven roving και unidirectional	Βάρος ανά μονάδα επιφανείας (<i>g/m²</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 10%	ISO 4605 ή αντίστοιχο ⁶
	Έλεγχος εφελκυσμού σε πολύστρωτο: • <i>Modulus (N/mm²)</i> • όριο παραμόρφωσης (%)	Σύμφωνα με τους κανονισμούς	ISO 3268 ή αντίστοιχο ⁷
Προ- εμποτισμένα υφάσματα (Pre-preg)	Ποσοστό ενισχύσεων σε μάζα (%)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 5%	ISO 1172 ή αντίστοιχο ⁶
	Βάρος ανά μονάδα επιφάνειας (<i>g/m²</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 5%	ISO 10352 ή αντίστοιχο ⁶
	Έλεγχος εφελκυσμού σε πολύστρωτο:: • <i>Modulus (N/mm²)</i> • όριο παραμόρφωσης (%)	Σύμφωνα με τους κανονισμούς	ISO 3268 ή αντίστοιχο ⁷
	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 5%	ISO 11357-2 ή αντίστοιχο ¹
	Πυκνότητα (<i>kg/m³</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 5%	ISO 845 ή αντίστοιχο ⁸

Αφρώδες υλικό για Sandwich (Για χρήση σε πυρήνες) ⁹	<i>Tensile modulus</i> (<i>N/mm²</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 5%	ISO 1926 ή αντίστοιχο
	Διάτμηση: • <i>Modulus</i> (<i>N/mm²</i>) • Μέγιστη αντοχή (<i>N/mm²</i>)	≥ 85% των τιμών που δίνονται στην Ενότητα 4 (NR-546), Πίνακας 3 (NR-546)	ISO 1922 ή αντίστοιχο
	Απορρόφηση νερού (% σε όγκο για 7 ημέρες)	≤ 2,5%	ISO 2896 ή αντίστοιχο ¹⁰
	Αντοχή σε προσβολή από στυρόλιο (όταν είναι εφικτό): • έλεγχος διαστάσεων • έλεγχος μάζας	≤ 2%	ISO 175 ή αντίστοιχο ⁸
Ξύλο <i>Balsa</i> για Sandwich (<i>end grain</i>)	Πυκνότητα (<i>kg/m³</i>)	Ονομαστική τιμή του κατασκευαστή +/- 5%	ISO 3131 ή αντίστοιχο
	<i>Tensile modulus</i> (<i>N/mm²</i>)	≥ 85% των τιμών που δίνονται στην Ενότητα 4 (NR-546), Πίνακας 4 (NR-546)	ISO 3345 ή αντίστοιχο
	Διάτμηση: • <i>Modulus</i> (<i>N/mm²</i>) • Μέγιστη αντοχή (<i>N/mm²</i>)	≥ 85% των τιμών που δίνονται στην Ενότητα 4 (NR-546), Πίνακας 4 (NR-546)	ISO 8905 ή αντίστοιχο

¹ Διαδικασία πολυμερισμού του δείγματος όπως ορίζει ο κατασκευαστής.

² Μήκος δείγματος: 150 mm.

³ Απεσταγμένο νερό στους 23 °C. Κυκλικό δείγμα διαμέτρου 50 mm και πάχους 3 mm.

⁴ Τρία δείγματα του ενός μέτρου σε μήκος.

⁵ Έξι δείγματα των διαστάσεων 300 x 300 mm.

⁶ Τρία δείγματα των 300 x 300 mm.

⁷ Τα τεστ εφελκυσμού θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε δύο διευθύνσεις του υλικού. Τα τεστ σε υφάσματα εξαιρουμένων των προ-εμποτισμένων θα πρέπει να γίνονται με την παρουσία εγκεκριμένης από τον νηογνώμονα ρητίνης. Ως κανόνα, τα δείγματα θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον τρεις στρώσεις υφάματος για να θεωρούνται αποδεκτά. Ενώ θα πρέπει να αναφέρεται το ποσοστό της μάζας της ενίσχυσης στο συνολικό πολύστρωτο.

⁸ Τρία δείγματα διαστάσεων 100 mm x 100 mm x πάχους πλάκας.

⁹ Μπορεί να ζητηθεί, για αφρώδη υλικά που χρησιμοποιούνται ως πυρήνες σε Sandwich πάνελ κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού να έχουμε επιβολή θερμότητας, τα αφρώδη υλικά θα υποστούν την ίδια επιβολή θερμότητας πριν από την διεξαγωγή του τεστ.

¹⁰ Τρία δείγματα των 150 mm x 150 mm x πάχους (ελάχιστο όγκος 500 cm³ σε κάθε δείγμα).

¹¹ Διαδικασία σκλήρυνσης και υλικό δειγμάτων που πρέπει να καθοριστούν από τον κατασκευαστή.

¹² Τεστ μπορεί να ζητηθεί σε διαφορετική θερμοκρασία (δες Sec. 4, [5.2.3] του NR-546).

Σε ειδικές περιπτώσεις ο νηογνώμονας μπορεί να ζητήσει έλεγχο κατασκευαστικών στοιχείων σε κόπωση. Παρόλα αυτά συχνά ο έλεγχος αυτός παραλείπεται, διότι έχει συμπεριληφθεί μέσα στους συντελεστές ασφαλείας η πιθανότητα αστοχίας από κόπωση.

Χρησιμοποιούμενα υλικά

Σύμφωνα με τους κανονισμούς τα κύρια υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σκαφών από σύνθετα υλικά είναι:

- Οι ρητίνες
- Οι ενισχύσεις
- Οι πυρήνες
- Τα υλικά συγκόλλησης

Ο νηογνώμονας ορίζει ελάχιστα πρότυπα για την ποιότητα των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν όπως είναι:

- Οι περιορισμοί στα υλικά όπως ορίζονται στο κεφάλαιο 1.3.1.
- Επαλήθευση των μηχανικών ιδιοτήτων με βάση τους ενδεικτικούς πίνακες των κανονισμών που δίνουν ελάχιστες τιμές.
- Πειραματικές μελέτες για την επαλήθευση των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Για να μπορέσει να εξασφαλίσει την ποιότητα των υλικών ο νηογνώμονας θα πρέπει να έχει στη διάθεση του όλα τα απαραίτητα έγγραφα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών όπως αυτός ορίζει.

Ενδεικτικά στην περίπτωση των σύνθετων υλικών τύπου *Sandwich* θα πρέπει να γίνεται υποχρεωτικά πειραματικός έλεγχος σε δοκίμιο για να εξακριβωθεί η ποιότητα αυτού. Ακόμα, συστήνεται η χρήση αφρώδους υλικού με σύσταση που δεν επιτρέπει την απορρόφηση νερού ενώ θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην συμβατότητα των υλικών αυτών σε περίπτωση συνδυασμού με διάφορες ρητίνες και ενισχύσεις. Μερικά από αυτά τα υλικά ενδέχεται να χρειάζεται να προθερμαθούν έτσι ώστε να

επιτευχθεί μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων κατά την διαδικασία πολυμερισμού, ενώ είναι αρμοδιότητα του κατασκευαστή να χρησιμοποιήσει το βέλτιστο τρόπο για αυτή τη διαδικασία. Επίσης, στην περίπτωση των διογκωμένων πολυμερών, αυτά θα πρέπει να φέρουν πιστοποιήσεις για τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους τα οποία όμως θα πρέπει να επαληθεύονται πειραματικά.

Ο νηογνώμονας, λόγω της μεγάλης ποικιλίας που υπάρχει στα κυψελοειδή υλικά αναφέρει πως θα πρέπει να γίνεται ειδική μελέτη ανά περίπτωση, ενώ θα πρέπει να πραγματοποιούνται πειράματα για την εξακρίβωση της ορθότητας των θεωρητικών αποτελεσμάτων, με βάση την ενότητα 11 των κανονισμών NR-546.

Ενδεικτικές και ελάχιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων υλικών

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες 2.4 έως 2.9, από τους κανονισμούς του νηογνώμονα, οι οποίοι δίνουν ελάχιστες τιμές και ενδεικτικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα. Αξίζει να επισημανθεί ότι ο λόγος που δίνονται ενδεικτικές τιμές για κάποια υλικά, όπως είναι τα αφρώδη, οι κυψέλες και τα ξύλα, οφείλεται στο γεγονός ότι τα συγκεκριμένα υλικά πολύ εύκολα μπορεί να διαφέρουν ως προς τις μηχανικές ιδιότητες τους, λόγω των πολλών μεταβλητών που τις καθορίζουν, από την κατασκευή τους έως την χρήση τους.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών της μήτρας δίνονται από τον κατασκευαστή έπειτα από πιστοποίηση και πειράματα ενώ στον παρακάτω πίνακα 2.4 δίνονται τα ελάχιστα πρότυπα τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούνται σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 2.4. Ελάχιστα πρότυπα τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούν οι μήτρες σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5].

	Πολυεστερική	Βινυλεστερική	Εποξική
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.20	1.10	1.25
Συντελεστής <i>Poisson</i>	0.38	0.26	0.39
<i>Young modulus</i> (N/mm ²)	3550	3350	3100
<i>Εφελκυστική ή Συμπιεστική τάση θραύσης</i> (N/mm ²)	55	75	75
Παραμόρφωση στη θραύση (σε εφελκυσμό ή θλίψη) (%)	1.8	2.2	2.5
Συντελεστής Διάτμησης (N/mm ²)	1350	1400	1500
Διατμητική τάση θραύσης (N/mm ²)	~ 50	~ 65	~ 80
Διατμητική παραμόρφωση θραύσης (%)	3.8	3.7	5.0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης <i>T_g</i> (°C)	~ 60 °C	~ 100 °C	80 – 150 °C

Οι ελάχιστες τιμές που ορίζει ο νηογνώμονας για τις μηχανικές ιδιότητες των ενισχύσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5. Ελάχιστα πρότυπα τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούν οι ενισχύσεις σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5].

		Γυαλί		Άνθρακας			Para-aramid
		E	R	HS	IM	HM	
Πυκνότητα (g/cm ³)		2.57	2.52	1.79	1.75	1.88	1.45
Εφελκυσμός στην διεύθυνση των ινών	Συντελεστής Poisson	0.238	0.2	0.3	0.32	0.35	0.38
	Young Modulus (N/mm ²)	73100	86000	238000	350000	410000	129000
	Παραμόρφωση στη θραύση (%)	3.8	4.0	1.5	1.3	0.6	2.2
	Όριο θραύσης (N/mm ²)	2750	3450	3600	4500	4700	2850
Εφελκυσμός κάθετα στη διεύθυνση της ίνας	Συντελεστής Poisson, V _f	0.238	0.2	0.02	0.01	0.01	0.015
	Young Modulus E _{f90} (N/mm ²)	73100	86000	15000	10000	13800	5400
	Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.4	2.4	0.9	0.7	0.45	0.7
	Όριο θραύσης (N/mm ²)	1750	2000	135	70	60	40
Συμπίεση στην διεύθυνση της ίνας	Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.4	2.4	0.9	0.6	0.45	0.4
	Όριο θραύσης (N/mm ²)	1750	2000	2140	2100	1850	500
Διάτμηση	Συντελεστής διάτμησης (N/mm ²)	30000	34600	50000	35000	27000	12000
	Παραμόρφωση στη θραύση (%)	5.6	5.6	2.4	3.0	3.8	4.0
	Όριο θραύσης (N/mm ²)	1700	1950	1200	1100	1000	500

Όσον αφορά τις ίνες από γυαλί που χρησιμοποιούνται, ο νηογνώμονας ορίζει πως πρέπει έχουν πιστοποίηση *ISO 2078*, ενώ κατασκευαστές τους θα πρέπει να παρέχουν τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Τύπος γυαλιού.
- Τύπος νήματος, (C) για συνεχόμενες και (D) για μη συνεχόμενες ίνες.
- Διάμετρος νήματος (σε μm).
- Πυκνότητα σε *tex* (g/km)

Ο παρακάτω πίνακας 2.6 του νηογνώμονα δίνει τις συνηθέστερες τιμές που μπορεί να έχουν οι μηχανικές ιδιότητες των αφρώδων υλικών που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική:

Πίνακας 2.6. Συνηθέστερες τιμές ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων για αφρώδη υλικά [5].

Τύπος αφρώδους υλικού	Πυκνότητα (kg/m^3)	Modulus			Συντελεστής <i>Poisson</i> V_{12}, V_{21}	Τάση Θραύσης		
		Εφελκυσμού E_1, E_2 (N/mm^2)	Συμπίεσης E_3 (N/mm^2)	Διάτμησης G_{12}, G_{13}, G_{23} (N/mm^2)		Εφελκυσμό σ_1, σ_2 (N/mm^2)	Συμπίεση σ_1, σ_2 (N/mm^2)	Διάτμηση $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ (N/mm^2)
Γραμμικό PVC	50.00	21.00	18.00	8.00	0.36	0.70	0.30	0.30
	60.00	29.00	28.00	11.00	0.31	0.90	0.40	0.50
	70.00	37.00	38.00	14.00	0.27	1.10	0.60	0.70
	80.00	44.00	49.00	18.00	0.25	1.30	0.70	0.80
	90.00	52.00	59.00	21.00	0.24	1.40	0.90	1.00
	100.00	59.00	69.00	24.00	0.23	1.60	1.00	1.20
	110.00	67.00	79.00	27.00	0.22	1.80	1.20	1.30
	130.00	82.00	99.00	34.00	0.21	2.20	1.50	1.70
	140.00	89.00	109.00	37.00	0.21	2.40	1.60	1.90
	50.00	37.00	40.00	18.00	0.02	1.00	0.60	0.60
	60.00	47.00	51.00	22.00	0.05	1.40	0.80	0.80

<i>Cross linked PVC</i>	70.00	57.00	63.00	27.00	0.07	1.80	1.10	1.00
	80.00	67.00	75.00	31.00	0.08	2.20	1.40	1.10
	90.00	78.00	88.00	36.00	0.09	2.50	1.70	1.30
	100.00	88.00	102.00	40.00	0.10	2.90	1.90	1.50
	110.00	98.00	116.00	44.00	0.11	3.30	2.20	1.60
	130.00	118.00	145.00	53.00	0.12	3.90	2.80	2.00
	140.00	129.00	161.00	57.00	0.12	4.30	3.00	2.20
	170.00	159.00	209.00	71.00	0.13	5.20	3.80	2.70
	190.00	180.00	243.00	79.00	0.13	5.80	4.40	3.00
	200.00	190.00	260.00	84.00	0.13	6.10	4.70	3.20
	250.00	241.00	352.00	105.00	0.14	7.40	6.00	4.10
<i>SAN</i>	50.00	52.00	29.00	13.00	0.11	0.90	0.40	0.70
	60.00	65.00	37.00	16.00	0.18	1.20	0.50	0.80
	70.00	78.00	44.00	18.00	0.20	1.50	0.60	0.90
	80.00	92.00	50.00	21.00	0.19	1.70	0.80	1.00
	90.00	107.00	55.00	23.00	0.17	1.90	0.90	1.10
	100.00	122.00	60.00	26.00	0.15	2.00	1.10	1.20
	110.00	137.00	64.00	29.00	0.12	2.20	1.20	1.30
	130.00	168.00	71.00	34.00	0.06	2.50	1.60	1.50
	140.00	184.00	74.00	36.00	0.03	2.60	1.80	1.60
	170.00	234.00	83.00	43.00	0.03	2.90	2.40	1.90
	190.00	268.00	88.00	48.00	0.03	3.10	2.80	2.10
200.00	285.00	90.00	51.00	0.03	3.10	3.00	2.10	
<i>PMI</i>	50.00	54.00	59.00	21.00	0.40	1.90	0.80	0.80
	60.00	69.00	76.00	24.00	0.60	2.10	1.10	1.00
	70.00	84.00	94.00	28.00	0.60	2.30	1.50	1.20
	80.00	101.00	112.00	33.00	0.70	2.60	1.90	1.50
	90.00	119.00	132.00	39.00	0.70	2.90	2.30	1.80
	100.00	137.00	152.00	45.00	0.70	3.20	2.70	2.10
	110.00	155.00	173.00	52.00	0.60	3.60	3.20	2.40
	130.00	195.00	217.00	71.00	0.50	4.50	4.20	3.10
	140.00	215.00	239.00	83.00	0.40	5.00	4.80	3.50
	170.00	280.00	311.00	131.00	0.20	6.80	6.70	4.70

Ο παρακάτω πίνακας 2.7 του νηογώμονα δίνει ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά για ξύλο *Balsa*.

Πίνακας 2.7. Ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά, για ξύλο *Balsa*, σύμφωνα με το νηογώμονα [5].

Βασικά χαρακτηριστικά	Πυκνότητα (kg/m^3)								
	80	96	112	128	144	160	176	192	240
Young's moduli, παράλληλα στο επίπεδο του sandwich E_1, E_2 (N/mm^2)	23	33	42	51	61	71	80	89	116
Young's modulus, κάθετα στο επίπεδο του sandwich E_3 (N/mm^2)	1522	2145	2768	3460	4083	4706	5328	5882	7750
Shear moduli, κάθετα στο επίπεδο του sandwich G_{13}, G_{23} (N/mm^2)	57	80	103	127	150	174	197	218	286
Shear modulus, παράλληλα στο επίπεδο του sandwich G_{12} (N/mm^2)	40	55	70	90	105	120	140	150	200
Συντελεστές Poisson V_{12}, V_{21}	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Όριο θραύσης σε συμπίεση κάθετα στο επίπεδο του sandwich σ_3 (N/mm^2)	3.530	5.120	5.950	8.170	9.690	11.350	12.800	14.320	18.960
Όριο θραύσης σε εφελκυσμό, παράλληλα στο επίπεδο του sandwich σ_1, σ_2 (N/mm^2)	0.280	0.340	0.420	0.510	0.560	0.640	0.690	0.780	1.000
Όριο θραύσης σε συμπίεση,	0.480	0.580	0.710	0.870	0.950	1.100	1.170	1.330	1.700

παράλληλα στο επίπεδο του sandwich σ_1, σ_2 (N/mm^2)									
Όριο θραύσης σε συμπίεση, στη διεύθυνση του πάχους του sandwich τ_{13}, τ_{23} (N/mm^2)	0.940	1.100	1.330	1.620	1.730	1.930	2.050	2.330	2.930
Όριο θραύσης σε συμπίεση (N/mm^2), παράλληλα στο επίπεδο του sandwich τ_{12}	0.700	0.900	1.200	1.500	1.800	2.000	2.300	2.500	3.400

Ο παρακάτω πίνακας 2.8 του νηογνώμονα δίνει ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά για το ξύλο *Red Cedar*.

Πίνακας 2.8: Ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά για το ξύλο *Red Cedar* σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5].

Βασικά χαρακτηριστικά	Πυκνότητα (kg/m^3)		
	0.33	0.40	0.46
Young modulus παράλληλα στα νερά του ξύλου E_1 (N/mm^2)	7160	8730	10000
Young moduli κάθετα στα νερά του ξύλου E_2, E_3 (N/mm^2)	310	440	560
Συντελεστής Διάτμησης G_{12} (N/mm^2)	620	710	775
Συντελεστής Διάτμησης G_{23} (N/mm^2)	110	160	200
Συντελεστής Διάτμησης G_{13} (N/mm^2)	580	720	850
Λόγος <i>Poisson</i> ν_{12}	0.48	0.47	0.47

Λόγος Poisson V_{21}	0.02	0.02	0.03
Όριο θραύσης σε εφελκυσμό παράλληλα στα νερά του ξύλου σ_1 (N/mm^2)	50	60	70
Όριο θραύσης σε εφελκυσμό κάθετα στα νερά του ξύλου σ_2 (N/mm^2)	2	2	2
Όριο θραύσης σε συμπίεση παράλληλα στα νερά του ξύλου σ_1 (N/mm^2)	28	34	39
Όριο θραύσης σε συμπίεση κάθετα στα νερά του ξύλου σ_2 (N/mm^2)	4	5	7
Όριο θραύσης σε διάτμηση τ_{12}, τ_{13} (N/mm^2)	7	8	9
Όριο θραύσης σε διάτμηση τ_{23} (N/mm^2)	8	10	11

Ο παρακάτω πίνακας 2.9 του νηογνώμονα δίνει ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά του *m*-αραμιδίου κυψελοειδούς δομής (*Meta-Aramid Honeycomb*).

Πίνακας 2.9. Ενδεικτικά μηχανικά χαρακτηριστικά για το *Meta-Aramid Honeycomb* σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5].

πυκνότητα (kg/m^3)	Εξαγωνικό								
	E_1 (στη κατεύθυνση W)	E_2 (στη κατεύθυνση L)	G_{12}	G_{13}	G_{23}	V_{12}	V_{21}	τ_{13} (στη κατεύθυνση L)	τ_{23} (στη κατεύθυνση W)
48	13	16	3.0	37.0	25.0	0.820	0.820	1.200	0.700
50	13	17	3.3	39.0	26.0	0.820	0.820	1.300	0.750
56	14	18	4.1	46.0	30.0	0.820	0.820	1.500	0.850
64	17	20	5.0	59.0	38.0	0.820	0.820	1.800	1.000
96	21	27	6.0	87.0	57.0	0.820	0.820	3.000	1.700
πυκνότητα (kg/m^3)	Ορθογωνικό								
	E_1 (στη κατεύθυνση W)	E_2 (στη κατεύθυνση L)	G_{12}	G_{13}	G_{23}	V_{12}	V_{21}	τ_{13} (στη κατεύθυνση L)	τ_{23} (στη κατεύθυνση W)
48	105	12.5	1.5	19.0	36.0	0.263	0.263	0.750	0.800
50	108	12.8	1.6	19.5	37.0	0.263	0.263	0.800	0.850

56	114	13.0	1.9	21.0	40.0	0.263	0.263	0.950	0.900
64	135	13.5	2.1	23.5	43.5	0.263	0.263	1.100	1.000
96	180	15.5	3.3	31.0	58.0	0.263	0.263	1.900	1.500

Ποσοστά ανάμειξης

Ο νηογνώμονας αναγνωρίζοντας την μεγάλη σημασία που έχουν τα ποσοστά ανάμειξης των επιμέρους συστατικών των σύνθετων, ορίζει τα ποσοστά αυτά ανάλογα με την κατασκευαστική διαδικασία του συνθέτου που ακολουθείται. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 2.10 στον οποίο δίνεται το ποσοστό ρητίνης / ενίσχυσης, σύμφωνα με τους κανονισμούς που έχουν οριστεί.

Πίνακας 2.10. Ποσοστά ανάμειξης ρητίνης / ενίσχυση σύμφωνα με τον νηογνώμονα [5].

Διαδικασία που ακολουθήθηκε	V_f		M_f		
			Γυαλί	Άνθρακας	Para-Aramid
Εναπόθεση με το χέρι	CSM ¹	από 15 έως 20	από 25 έως 35	-	-
	WR ²	από 25 έως 40	από 40 έως 60	από 35 έως 50	από 30 έως 45
	UD ³	από 40 έως 50	από 60 έως 70	από 50 έως 60	από 45 έως 55
Infusion	CSM ¹	20	30	55	50
	WR ² ή UD ³	45	60		
Προ-εμποτισμένα	από 55 έως 60		από 60 έως 70	από 65 έως 70	από 60 έως 65

¹ Chopped Strand Mat. ² Woven Roving. ³ Uni-Directional.

Πάχος μεμονωμένης στρώσης

Ο νηογνώμονας δίνει τους τύπους 2.57 και 2.58 βάσει των οποίων μπορεί να υπολογιστεί σε mm το πάχος μεμονωμένης στρώσης πολύστρωτου, ανάλογα με το αν δίνεται η μάζα ή ο όγκος.

$$e = \frac{P_f \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-M_f}{M_f \rho_r} \right)}{1000} \quad (2.57)$$

$$e = \frac{\rho_f \left(\frac{1}{V_f \rho_f}\right)}{1000} \quad (2.58)$$

Η πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο για κάθε στρώση:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_f (1 - V_f) \quad (2.59)$$

Κανονισμοί ειδικών εξαρτημάτων του πλοίου

Ο νηογνώμονας έχει εκδώσει ειδικούς κανονισμούς με την ονομασία NR-590 «*Rudders in Composite Materials*» οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν και την περίπτωση πηδαλίου από σύνθετα υλικά. Οι κανόνες 590 έρχονται να συμπληρώσουν αυτούς των 546 και 467 Pt.B Ch.10 Sec.1, ενώ αυτοί οι κανονισμοί χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που δεν μπορεί να εφαρμοστεί ο κανονισμός 500. Συγκεκριμένα, αναφέρεται πως θα πρέπει να πραγματοποιούνται πειραματικές δοκιμές στο εξάρτημα, τα αποτελέσματα των οποίων θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για το εξάρτημα συνολικά. Οι βασικές λεπτομέρειες αναφέρονται στο NR-546, Ch.10, με το νηογνώμονα να επισημαίνει πως ενδείκνυται η χρήση κατάλληλων προγραμμάτων κατά τη σχεδίαση, ώστε να γίνεται προσομοίωση του τελικού αντικειμένου.

Τέλος, ο νηογνώμονας έχει εκδώσει ειδικούς κανονισμούς με την ονομασία NR-663 «*Propeller in Composite Materials*», τον Οκτώβριο του 2020, για την περίπτωση προπέλας από σύνθετα υλικά. Στον κανονισμό αυτό αναφέρει επιγραμματικά πως θα πρέπει να γίνονται επιμέρους πειραματικές δοκιμές, όπως επίσης πως θα πρέπει να κατασκευάζεται πρωτότυπο με την λεπίδα της προπέλας σε κανονικό μέγεθος. Ακόμα θα πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και να γίνεται δοκιμή της έλικας στο νερό. Ιδιαίτερη σύσταση δίνεται στην εξωτερική επίστρωση χρώματος που θα φέρει η προπέλα, δεδομένου ότι διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αντίσταση (λεία επιφάνεια) και την προστασία του πολύστρωτου.

2.5.2 Νηογνώμονας LLOYDS

Ο νηογνώμονας Lloyds τον Ιούλιο του 2019 εξέδωσε την τελευταία έκδοση βιβλίου - κανονισμών με τίτλο “*Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*” [15] στο οποίο αναγράφονται οι βασικές αρχές και κανονισμοί για τα κριτήρια που θα πρέπει να πληροί ένα σκάφος από σύνθετα υλικά. Παρόλο που πρόκειται για διαφορετικό νηογνώμονα παρατηρούνται ομοιότητες με τον προηγούμενο αλλά και ορισμένες διάφορες στις μεθοδολογίες και στα πρότυπα που ορίζονται.

Οι κανονισμοί αυτοί αφορούν μονόγαστρα αλλά και πολύγαστρα σκάφη, ενώ αν και αναφέρονται κυρίως σε σύνθετα υλικά (π.χ. πολυστρωτα) ή *Sandwich* με ενισχύσεις από ίνες, δίνεται η δυνατότητα χρήσης και άλλων τύπων υλικών έπειτα από εξέταση από τον νηογνώμονα.

Έγγραφα που απαιτείται να παραδοθούν

Στο νηογνώμονα θα πρέπει να κατατίθενται έγγραφα σχετικά με τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή. Τα υλικά θα πρέπει να έχουν λάβει την απαραίτητη πιστοποίηση από τον νηογνώμονα πριν χρησιμοποιηθούν, ενώ σε περίπτωση υλικών τύπου *Sandwich* το κάθε επιμέρους υλικό θα πρέπει να έχει πιστοποίηση από αυτόν. Εκτός από τα μηχανικά χαρακτηριστικά θα πρέπει να δίνονται και οι περιεκτικότητες κατά βάρος της ενίσχυσης και της μήτρας σε κάθε περίπτωση, ενώ θα πρέπει να κατατίθενται και έγγραφα στα οποία να αναγράφεται με λεπτομέρειες η συνολική διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Ποιοτικός έλεγχος υλικών

Οι κατασκευαστές επιβάλλεται να χρησιμοποιούν υλικά και τεχνικές κατασκευής οι οποίες θα είναι πιστοποιημένες από τον νηογνώμονα ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα πρέπει πριν προβούν σε κάποια ενέργεια, με δική τους ευθύνη, να εξασφαλίσουν ότι θα έχουν την συγκατάθεση του νηογνώμονα για να μπορέσουν να προχωρήσουν.

Τα συστήματα ελέγχου και εξασφάλισης ποιότητας (QC) των κατασκευαστών θα πρέπει όσον αφορά τα σύνθετα υλικά να καλύπτουν μια από τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Σύστημα Διασφάλισης Ποιότητας σύμφωνα με ένα Διεθνές ή Εθνικό Πρότυπο (δηλαδή *ISO 9000* και *BS ENISO 9001*) με αξιολόγηση και πιστοποίηση που πραγματοποιείται από έναν εθνικό διαπιστευμένο οργανισμό και πρέπει να ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιοτικού ελέγχου, σύμφωνα με το στοιχείο γ).
- Το τοπικά αποδεκτό σύστημα ποιοτικού ελέγχου της *LR - To Builder* εφαρμόζει ένα τεκμηριωμένο σύστημα ποιοτικού ελέγχου το οποίο ελέγχει τις δραστηριότητες οι οποίες υποδεικνύονται παρακάτω, (βλ. επίσης *Ch.14.5* του *LR*).
 1. Χώρος καλουπιών.
 2. Συντήρηση και προετοιμασία καλουπιών και εργαλείων.
 3. Διαδικασία εναπόθεσης με το χέρι.
 4. Έλεγχος κατά την διαδικασία αποκαλούπωσης του προϊόντος.
 5. Εγκατάσταση μηχανουργικών εργαλείων και αναγκαίων συστημάτων.
 6. Δοκιμαστικά πειράματα και δοκιμές.
 7. Καταγραφές.
 8. Κανόνες και έγγραφα ελέγχου.
 9. Έγγραφα παραλαβής, υλικών, εργαλείων κτλ.

Ο νηογνώμονας αναφέρει πως θα πρέπει στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εναπόθεση με το χέρι ή εκνέφωση (*spray*), αλλά και κατά την διάρκεια του πολυμερισμού ο χώρος να έχει σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία που δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τους 25 °C, αλλά και να μην είναι χαμηλότερη από τους 16 °C. Επίσης το ποσοστό της υγρασίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 70%. Θα πρέπει να καταγράφονται οι θερμοκρασιακές μεταβολές καθώς και μεταβολές της υγρασίας μέσα στο χώρο κατασκευής, σε όλη την διάρκεια των εργασιών. Αποτελεί ευθύνη του κατασκευαστή να εξασφαλίζει συνθήκες φιλικές προς τους εργαζομένους.

Ο χώρος αποθήκευσης θα πρέπει να μην έχει υγρασία καθώς και να κλιματίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει ο κατασκευαστής των υλικών ενώ η θερμοκρασία δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 16 °C. Τα υλικά της ενίσχυσης θα πρέπει να αποθηκεύονται σε χώρους με περιορισμένη υγρασία και μακριά από σκόνη.

Τα καλούπια θα πρέπει να κατασκευάζονται από υλικά που εξασφαλίζουν τη μη πρόκληση παραμορφώσεων αλλά και την αντοχή στις μήτρες που μπορεί να χρησιμοποιηθούν πάνω σε αυτά. Ακόμα θα πρέπει να δίνεται προσοχή έτσι ώστε τα αντικολλητικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για το καλούπι να μην προκαλέσουν φθορά, ούτε σ' αυτό αλλά ούτε στο προϊόν που θα κατασκευαστεί. Ο βαθμός σκληρότητας των καλουπιών πρέπει να μετράται σύμφωνα με το πρότυπο *Barcol GYZJ 934-1*, σύμφωνα με το *BS 2782: Part 10: method 1001:1977 (1989)* ή σύμφωνα με άλλα εθνικά ή διεθνή πρότυπα.

Όλες οι αστοχίες και οι ζημιές θα πρέπει να καταγράφονται σύμφωνα με τους κανονισμούς που ορίζει ο νηογνώμονας, όσον αφορά τις απαιτήσεις για την διατήρηση της ποιότητας.

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως υλικό μήτρας θα πρέπει να έχουν την έγκριση του νηογνώμονα, ενώ ενδέχεται τμήμα από αυτές κατά την διαδικασία κατασκευής να ληφθεί από τον νηογνώμονα για έλεγχο ώστε να εξασφαλιστεί η ποιότητα και να ελεγχθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της. Οι χρόνοι πολυμερισμού, οι θερμοκρασίες και η συνολική διαδικασία ορίζεται από τον κατασκευαστή της ρητίνης έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα αυτής. Ο νηογνώμονας εφιστά ιδιαίτερη προσοχή όταν στη μήτρα χρησιμοποιούνται πρόσθετα, όπως χρώματα, γιατί ενδέχεται να αλλοιώσουν τις ιδιότητες της ρητίνης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πυρήνας θα πρέπει να έχουν πιστοποίηση από το νηογνώμονα και να έχει ελεγχθεί η συμπεριφορά τους σε σχέση με τα πολυμερή, τις ρητίνες, τα ενισχυτικά και γενικά με οποιοδήποτε υλικό θα βρίσκονται σε άμεση επαφή. Ο νηογνώμονας θα πρέπει να έχει έγγραφα που να πιστοποιούν τις ιδιότητες των υλικών αυτών, ενώ θα πρέπει τα υλικά αυτά να καλύπτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Για διογκωμένα υλικά:

- Να μην επηρεάζονται, αλλά και όσο το δυνατόν να μην απορροφούν νερό, καύσιμα και λάδια.
- Να εμφανίζουν σταθερότητα.
- Να είναι συμβατά με τις ρητίνες που θα χρησιμοποιηθούν.
- Να διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητες τους μέχρι την θερμοκρασία των 60 °C.
- Σε περίπτωση που αποτελούνται από στρώσεις οι οποίες συνδέονται με υλικά συγκόλλησης, θα πρέπει να έχει ελεγχθεί η συγκολλητική ουσία, ώστε να μην έχει χημική επίδραση στη ρητίνη.
- Οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων δεν θα πρέπει να είναι μικρότερες από αυτές που δίνονται στον πίνακα 2.11, σε θερμοκρασία 20 °C.

Πίνακας 2.11. Ελάχιστες μηχανικές ιδιότητες διογκωμένων υλικών σύμφωνα με τον νηογνώμονα [15].

Υλικό	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m^3)	Αντοχή (N/mm^2)			Συντελεστής ελαστικότητας (N/mm^2)	
		Εφελκυσμό	Συμπίεση	Διάτμηση	Συμπίεση	Διάτμηση
Πολυουρεθάνη	96	0.85	0.60	0.50	17.20	8.50
Πολυβινυλοχλωρίδιο	60					

Για το ξύλο *Balsa*:

- Να έχει σε όλο το μήκος του ίνες.
- Να έχει υποβληθεί σε χημική επεξεργασία κατά της προσβολής από μύκητες και έντομα και να ξηραίνεται σε κλίβανο αμέσως μετά την υλοτόμηση.
- Να έχει αποστειρωθεί.
- Να έχει ομογενοποιηθεί.
- Να έχει μέση περιεκτικότητα σε υγρασία 12%.

- Σε περίπτωση που αποτελείται από στρώσεις οι οποίες ενώνονται με κάποιο υλικό συγκόλλησης, θα πρέπει να έχει ελεγχθεί ώστε η συγκολλητική ουσία να μην επιδρά χημικά στη ρητίνη.
- Οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων δεν θα πρέπει να είναι μικρότερες από αυτές που δίνονται στον πίνακα 2.12.

Όσον αφορά τη ξυλεία, ως υλικό, θα πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας, απαλλαγμένη από μύκητες και άλλα φυσικά ελαττώματα, ενώ θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί ότι το ποσοστό υγρασίας είναι γύρω στο 15% και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερο.

Ο νηογνώμονας συστήνει ιδιαίτερη προσοχή στο ναυπηγείο ώστε να ακολουθούνται όλες οι οδηγίες, αλλά και να τηρούνται όλα τα σχετικά πρότυπα. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται μεμονωμένα κάθε περίπτωση.

Πίνακας 2.12. Ελάχιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων για το ξύλο *Balsa* σύμφωνα με τον νηογνώμονα [15].

Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m^3)	Δύναμη (N/mm^2)				Διάτμηση	Μέτρο ελαστικότητας σε συμπίεση (N/mm^2)		Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση (N/mm^2)
	Συμπίεση		Εφελκυσμός			Διεύθυνση της τάσης		
	Διεύθυνση της τάσης					Διεύθυνση της τάσης		
	Παράλληλα στα νερά του ξύλου	Κάθετα στα νερά του ξύλου	Παράλληλα στα νερά του ξύλου	Κάθετα στα νερά του ξύλου		Παράλληλα στα νερά του ξύλου	Κάθετα στα νερά του ξύλου	
96	5.00	0.35	9.00	0.44	1.10	2300	35.20	105
144	10.60	0.57	14.60	0.70	1.64	3900	67.80	129
176	12.80	0.68	20.50	0.80	2.00	5300	89.60	145

Θα πρέπει, σε καίρια δομικά στοιχεία, να υπάρχει συνέχεια των μηχανικών ιδιοτήτων σε όλο το μήκος τους όπως ορίζουν οι κανονισμοί. Όλα τα ανοίγματα θα πρέπει να έχουν εξομαλυμένες γωνίες και να έχουν στήριξη σε όλες τις πλευρές, ενώ το σχέδιο στήριξης θα πρέπει να κατατίθεται στο νηογνώμονα. Σε περίπτωση που υφίστανται συνδέσεις με χρήση οπών θα πρέπει προηγουμένως τα σχέδια να

εγκριθούν από το νηογνώμονα ενώ θα πρέπει επίσης να τηρούνται τα ελάχιστα πρότυπα που έχουν οριστεί για τις οπές αυτές.

Οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών βασίζονται σε επαληθευμένα πειραματικά αποτελέσματα. Οι πειραματικές δοκιμές βασίζονται στις απαιτήσεις που ορίζονται στο κεφάλαιο 14.3 των κανονισμών του νηογνώμονα, που αφορούν τα υλικά.

Ο νηογνώμονας λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες μεταβλητές που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχίες, δίνει τον παρακάτω πίνακα 2.13, με ενδεικτικές τιμές, που αναφέρονται στις παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στα διαφορά υλικά με τα πιθανά όρια αστοχίας από παραμόρφωση σε δυο καταστάσεις φόρτισης, εκφραζόμενα ως ποσοστά.

Πίνακας 2.13. Πιθανά όρια αστοχίας από παραμόρφωση σε δυο καταστάσεις φόρτισης [15].

	Εφελκυσμός (%)	Συμπίεση (%)
Γυαλί τύπου E	1.30	1.05
Ίνες από άνθρακα	0.90	0.55
Ίνες από αραμίδιο	1.30	0.60

Πρέπει, παρόλα αυτά να επισημανθεί πως οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές, δεδομένου ότι υπάρχει μια πληθώρα μεταβλητών που μπορεί να επηρεάζουν το αποτέλεσμα, όπως για παράδειγμα είναι η διεύθυνση κατά την οποία ασκείται η δύναμη.

Μηχανικές απαιτήσεις υλικών σε μονόγαστρα σκάφη

Όλα τα δείγματα που λαμβάνονται για εξέταση θα πρέπει να είναι πιστά αντίγραφα αυτών που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή. Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, με βάση τους κανονισμούς του νηογνώμονα και ανάλογα με το είδος της ενίσχυσης και το υλικό της μήτρας, παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες 2.14 – 2.20. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών στις περιπτώσεις

που φέρουν ενίσχυση από αραμίδιο και άνθρακα με εποξική μήτρα, δεν θα πρέπει, κατά τους υπολογισμούς, να είναι υψηλότερες από αυτές που προκύπτουν από τον πίνακα 2.16. Σημειώνεται ότι ως f_c ορίζεται η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες / ενίσχυση στο πολύστρωτο.

Πίνακας 2.14. Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Chopped Strand Mat (CSM)* γυαλιού με πολυεστερική μήτρα [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm^2)
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή (MPa)	$200 f_c + 25$
<i>Tensile modulus (MPa)</i>	$(15 f_c + 2) \times 10^3$
Μέγιστη αντοχή στη συμπίεση (MPa)	$150 f_c + 72$
<i>Compressive modulus (MPa)</i>	$(40 f_c - 6) \times 10^3$
Μέγιστη αντοχή στη διάτμηση (MPa)	$80 f_c + 38$
<i>Shear modulus (MPa)</i>	$(1,7 f_c + 2,24) \times 10^3$
Μέγιστη αντοχή στην κάμψη (MPa)	$502 f_c^2 + 106,8$
<i>Flexural modulus (MPa)</i>	$(33,4 f_c^2 + 2,2) \times 10^3$
Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο «Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1».	

Πίνακας 2.15. Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Woven Roving (WR)* και *Cross-Plied (CP)* από ίνες γυαλιού με πολυεστερική μήτρα, με προσανατολισμό 0/90° [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm^2)
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή (MPa)	$400 f_c - 10$
<i>Tensile modulus (MPa)</i>	$(30 f_c - 0,5) \times 10^3$

Μέγιστη αντοχή στην συμπίεση (MPa)	$150 f_c + 72$
<i>Compressive modulus (MPa)</i>	$(40 f_c - 6) \times 10^3$
Μέγιστη αντοχή στην διάτμηση (MPa)	$80 f_c + 38$
<i>Shear modulus (MPa)</i>	$(1,7 f_c + 2,24) \times 10^3$
Μέγιστη αντοχή στην κάμψη (MPa)	$502 f_c^2 + 106,8$
<i>Flexural modulus (MPa)</i>	$(33,4 f_c^2 + 2,2) \times 10^3$
Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο « Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1.»	

Πίνακας 2.16. Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Uni-Directional* από ίνες γυαλιού με πολυεστερική μήτρα, με προσανατολισμό 0/90° [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm ²)
Διάμηκες μέτρο ελαστικότητας	$(50,5 f_c - 6,87) \times 10^3$
Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας	$(19,6 f_c^2 - 15,7 f_c + 6,6) \times 10^3$
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο	$(7,3 f_c^2 - 5,9 f_c + 2,4) \times 10^3$
Διαμήκης εφελκυστική δύναμη	$656 f_c - 89,3$
Διαμήκης δύναμη συμπίεσης	$530 f_c - 72,1$
Εγκάρσια εφελκυστική δύναμη	$68,4 f_c^2 - 55 f_c + 23$
Εγκάρσια δύναμη συμπίεσης	$196 f_c^2 - 157 f_c + 65,6$
Διατμητική δύναμη στο επίπεδο	$73,4 f_c^2 - 59,2 f_c + 24,5$
Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο « Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1.»	
Σημείωση: Εύρος εφαρμογής: $0,4 < f_c < 0,7$. Πολύστρωτο το οποίο είναι εκτός ορίων σε περιεκτικότητα ινών θα πρέπει να υποβληθεί σε ειδική εξέταση.	

Πίνακας 2.17. Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Uni-Directional* από ίνες αραμιδίου με εποξική μήτρα και με προσανατολισμό 0/90° [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm ²)
Διάμηκες μέτρο ελαστικότητας	$(91,2f_c + 1,1) \times 10^3$
Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας	$(1,5f_c + 2,4) \times 10^3$
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο	$(8,6f_c^2 - 6,1f_c + 2,6) \times 10^3$
Διαμήκης εφελκυστική δύναμη	$1186f_c + 14,3$
Διαμήκης δύναμη συμπίεσης	$319f_c + 3,8$
Εγκάρσια εφελκυστική δύναμη	$7,5f_c + 12,1$
Εγκάρσια δύναμη συμπίεσης	$22,4f_c + 36,4$
Διατμητική δύναμη στο επίπεδο	$129f_c^2 - 92f_c + 38,4$
<p>Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο «Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1.»</p> <p>Σημείωση: Εύρος εφαρμογής: $0,25 < f_c < 0,55$. Πολύστρωτο το οποίο είναι εκτός ορίων σε περιεκτικότητα ινών θα υποβληθεί σε ειδική εξέταση.</p>	

Πίνακας 2.18. Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Woven Roving (WR)* και *Cross-Plied (CP)* από ίνες αραμιδίου και εποξική μήτρα και με προσανατολισμό 0/90° [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm ²)
Μέτρο ελαστικότητας	$(46,4f_c + 1,76) \times 10^3$
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο	$(8,6f_c^2 - 6,1f_c + 2,6) \times 10^3$
Αντοχή εφελκυσμού	$596f_c + 13,2$
Αντοχή σε συμπίεση	$171f_c + 20,1$
Διατμητική δύναμη στο επίπεδο	$129f_c^2 - 92f_c + 38,4$
<p>Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο «Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1.»</p> <p>Σημείωση: Εύρος εφαρμογής: $0,25 < f_c < 0,55$. Πολύστρωτο το οποίο είναι εκτός ορίων σε περιεκτικότητα ινών θα υποβληθεί σε ειδική εξέταση.</p>	

Πίνακας 2.19. Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Uni-Directional* από ίνες άνθρακα και εποξική μήτρα, με προσανατολισμό 0/90° [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm ²)
Διάμηκες μέτρο ελαστικότητας	$(153f_c - 9,80) \times 10^3$
Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας	$(5,8f_c^2 - 2,6f_c + 3,5) \times 10^3$
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο	$(8,9f_c^2 - 6,6f_c + 2,7) \times 10^3$
Διαμήκης εφελκυστική δύναμη	$1377f_c - 88,2$
Διαμήκης δύναμη συμπίεσης	$842f_c - 53,9$
Εγκάρσια εφελκυστική δύναμη	$21,7f_c + 7,5$
Εγκάρσια δύναμη συμπίεσης	$65,2f_c + 22,4$
Διατμητική δύναμη στο επίπεδο	$132f_c^2 - 99,5f_c + 40$
<p>Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο «Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1.»</p> <p>Σημείωση. Εύρος εφαρμογής: $0,3 < f_c < 0,6$. Πολύστρωτο το οποίο είναι εκτός ορίων σε περιεκτικότητα ινών θα υποβληθεί σε ειδική εξέταση.</p>	

Πίνακας 2.20: Μηχανικές ιδιότητες για ενίσχυση *Woven Roving (WR)* και *Cross-Plied (CP)* από ίνες άνθρακα και εποξική μήτρα, με προσανατολισμό 0/90° [15].

Μηχανικές ιδιότητες	(N/mm ²)
Μέτρο ελαστικότητας	$(78,7f_c - 4,15) \times 10^3$
Μέτρο διάτμησης στο επίπεδο	$(8,8f_c^2 - 6,6f_c + 2,7) \times 10^3$
Αντοχή εφελκυσμού	$690f_c - 35,3$
Αντοχή σε συμπίεση	$453f_c - 15,7$
Διατμητική δύναμη στο επίπεδο	$132f_c^2 - 99,5f_c + 40$

Σημειώνεται ότι το f_c ορίζεται στο «Pt 8, Ch 3, 1.5 Symbols and definitions 1.5.1.»

Σημείωση: Εύρος εφαρμογής: $0,3 < f_c < 0,6$. Πολύστρωτο το οποίο είναι εκτός ορίων σε περιεκτικότητα ινών θα υποβληθεί σε ειδική εξέταση.

Ελάχιστες απαιτήσεις για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών

Ο νηογνώμονας θέτει μέσω των κανονισμών του, ελάχιστα πρότυπα τόσο για τις ενισχύσεις που θα χρησιμοποιηθούν όσο και για τα υλικά μήτρας. Οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που θα πρέπει να πληρούν οι ενισχύσεις που χρησιμοποιούνται δίνονται στον πίνακα 2.21.

Πίνακας 2.21. Ελάχιστες τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών σύμφωνα με τις απαιτήσεις του νηογνώμονα *Lloyd* [15].

	Ειδικό βάρος ζ_F (g/cm^3)	Young modulus (N/mm^2)	Shear modulus (N/mm^2)	Λόγος Poisson μ_F
Γυαλί τύπου E	2.56	69000.00	28000.00	0.22
Γυαλί τύπου S	2.49	69000.00	3	0.20
Γυαλί τύπου R	2.58	3	3	3
Αραμίδιο	1.45	124000.00	2800.00	0.34
LM άνθρακας ¹	1.80	230000.00	3	3
IM άνθρακας ¹	1.80	270000.00	3	3
HM άνθρακας ¹	1.80	300000.00	3	3
IM άνθρακας ²	1.90	160000.00	3	3
HM άνθρακας ²	2.00	380000.00	3	3
VHM άνθρακας ²	2.15	725000.00	3	3

¹ Τύπος πολυακρυλονιτριλίου (PAN).

² Τύπος πρόδρομου βήματος μεσόφασης (Mesophase pitch precursor type).

³ Οι τιμές θα πρέπει να λαμβάνονται από τον κατασκευαστή του υλικού και θα πρέπει να εγκρίνονται από το νηογνώμονα πριν χρησιμοποιηθούν.

Οι ελάχιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που θα πρέπει να έχουν οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται δίνονται στον πίνακα 2.22.

Πίνακας 2.22. Ελάχιστες τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες ρητινών σύμφωνα με τον νηογνώμονα Lloyds [15].

Είδος ρητίνης	Τύπος ρητίνης	Ειδικό βάρος ζ_R (g/cm^3)	Young modulus (N/mm^2)	Shear modulus (N/mm^2)	Λόγος Poisson ν_R
Πολυεστερική	Θερμοσκληρυνόμενη	1.20	3400.00	1300.00	0.36
Βινυλεστερική	Θερμοσκληρυνόμενη	1.44	3500.00	1	1
Εποξική	Θερμοσκληρυνόμενη	1.38	3500.00	1	0.39
Φαινολική	Θερμοσκληρυνόμενη	1.30	1500.00-2500.00 ¹	1	1

¹ Οι τιμές θα πρέπει να λαμβάνονται από τον κατασκευαστή του υλικού και θα πρέπει να εγκρίνονται από το νηογνώμονα πριν χρησιμοποιηθούν.

Πάχος μεμονωμένης στρώσης

Προσεγγιστικός τύπος υπολογισμού του πάχους κάθε στρώσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση 2.60.

$$t_i = \frac{m_{Fi} \left[\frac{\zeta_{Fi}}{f_{ci}} - (\zeta_{Fi} - \zeta_{Ri}) \right]}{1000 \zeta_{Fi} \zeta_{Ri}} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (2.60)$$

όπου

m_{Fi} : μάζα της ενίσχυσης σε κάθε μεμονωμένη στρώση i , σε g/m^2 .

ζ_{Fi} : ειδικό βάρος της ενίσχυσης σε κάθε μεμονωμένη στρώση i .

ζ_{Ri} : ειδικό βάρος της μήτρας (ρητίνης) σε κάθε μεμονωμένη στρώση i .

f_{ci} : η περιεκτικότητα σε ίνες ενίσχυσης, κατά βάρος, στο πολύστρωτο i .

2.5.3 Νηογνώμονας DNV-GL

Ο νηογνώμονας DNV-GL τον Ιούλιο του 2020 εξέδωσε την τελευταία έκδοση βιβλίου - κανονισμών με τίτλο *“Rules for classification, class programmes, class guidelines, offshore standards and statutory interpretations”* [16, 17] στο οποίο αναγράφονται οι βασικές αρχές και κανονισμοί για τα κριτήρια που θα πρέπει να πληροί ένα σκάφος από σύνθετα υλικά σύμφωνα με αυτόν. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία που παρατίθενται παρακάτω βασίζονται στο *“DNV-GL rules for classification: High speed and light craft (RU-HSLC) ”* [18] το οποίο εκδόθηκε το 2018 και τροποποιήθηκε το 2020, καθώς και από το πρόγραμμα του νηογνώμονα με τίτλο *“DNV-GL class programmes (CP) ”* και πιο συγκεκριμένα από το έγγραφο με τίτλο *“Polyester resin, vinylester resin, gelcoat and topcoat”* [19] που εκδόθηκε το 2016.

Ελάχιστα πρότυπα και ιδιότητες

Σύμφωνα με τον νηογνώμονα ο κατασκευαστής θα πρέπει να έχει σύστημα ελέγχου ποιότητας που να καλύπτει τις προϋποθέσεις του ISO 9001 ή αντιστοίχων. Ο έλεγχος της ποιότητας κατά την διαδικασία κατασκευής θα πρέπει να δίνει ιδιαίτερη προσοχή στους παρακάτω τομείς:

- Στον έλεγχο κατά την παραλαβή νέων υλικών.
- Μέριμνα για το αν καλύπτονται τα πρότυπα που έχουν οριστεί για τον έλεγχο ποιότητας (QC).
- Σύστημα αρχειοθέτησης και σήμανσης των υλικών.
- Καταγραφή της διαδικασίας παραγωγής.
- Συνθήκες αποθήκευσης και κατεργασίας.

Ως επέκταση των παραπάνω θέτονται ελάχιστα πρότυπα από τον νηογνώμονα που θα πρέπει να καλύπτουν τα υλικά της μήτρας από πολυεστερική, βινυλεστερική ή εποξική ρητίνη όταν αυτά βρίσκονται σε υγρή μορφή.

Τα πρότυπα που θέτει ο νηογνώμονας για τα υλικά αυτά ορίζονται στον ακόλουθο πίνακα 2.23.

Πίνακας 2.23. Πρότυπα υλικών μήτρας που ορίζει ο νηογνώμονας [18].

Ιδιότητα που ελέγχεται	Πρότυπα δοκιμής ¹	Κριτήρια αποδοχής	Ελάχιστο επίπεδο επαλήθευσης	Συχνότητα ελέγχων
Πυκνότητα	ISO 1675	<i>msv</i>	Ημερολόγιο παραγωγής να είναι διαθέσιμο κατά την επιθεώρηση	Κάθε παρτίδα
Ιξώδες	ISO 2555 (1989) (2) (Brookfield) ή ISO 2884-1) (Cone/ plate)	<i>msv</i> ± 250 <i>mPas</i>	Ημερολόγιο παραγωγής να είναι διαθέσιμο κατά την επιθεώρηση	Κάθε παρτίδα
Περιεκτικότητα σε μονομερές	DIN 16945, παράγραφος 4.10 ISO 3251	<i>msv</i> ± 2%	Ημερολόγιο παραγωγής να είναι διαθέσιμο κατά την επιθεώρηση	Κάθε παρτίδα
<i>Gel time</i> ³	ISO 2535	Για σκλήρυνση σε θερμοκρασία δωματίου: <60 λεπτά: <i>msv</i> ± 5 λεπτά 60-120 λεπτά: <i>msv</i> ± 10 λεπτά >120 λεπτά : <i>msv</i> ± 15 λεπτά	Ημερολόγιο παραγωγής να είναι διαθέσιμο κατά την αρχική επιθεώρηση	Κάθε διαφορετική παρτίδα

¹Οποιοδήποτε χρήση άλλου στάνταρ θα πρέπει πρώτα να εγκριθεί από τον νηογνώμονα.

²Για πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι: Ιξωδόμετρο τύπου A, συχνότητα περιστροφής (*rotational frequency*): 10, θερμοκρασία 23°C. Το ιξώδες μπορεί να γίνει αποδεκτό για *msv* 20%.

³ Καθορισμός του καταλύτη και του σκληρυντή καθώς και του ποσοστού του καθενός.

Όσον αφορά τις ρητίνες σε στερεά μορφή, θα πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές που αναφέρονται στα παρακάτω πρότυπα του πίνακα 2.24.

Πίνακας 2.24. Πρότυπα υλικών μήτρας σε στερεά μορφή που ορίζει ο νηογνώμονας [18].

Ιδιότητα που ελέγχεται	Πρότυπα Τεστ ¹	Αριθμός παράλληλων δοκιμίων	Κριτήρια αποδοχής/μορφή δεδομένων			Ελάχιστο επίπεδο πιστοποίησης από τον νηογνώμονα
			Βαθμός 1	Βαθμός 2		
Πυκνότητα	ISO 1675	Τουλάχιστον: 3	<i>msv</i>	<i>msv</i>	<i>g/cm³</i>	Αρχική επιθεώρηση. Επιθεώρηση ανανέωσης.
Ογκομετρική συρρίκνωση λόγω σκλήρυνσης	ISO 3521	Τουλάχιστον: 3	<i>msv</i>	<i>msv</i>	%	Αρχική επιθεώρηση.
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή ²	ISO 527-1	Τουλάχιστον: 9	<i>mean</i> ελάχιστο 55	<i>mean</i> ελάχιστο 45	<i>MPa</i>	Αρχική επιθεώρηση. Επιθεώρηση ανανέωσης.
Συντελεστής εφελκυσμού	ISO 527-1.2	Τουλάχιστον: 9	<i>msv</i> ελάχιστο 3000	<i>msv</i> ελάχιστο 2700	<i>MPa</i>	Αρχική επιθεώρηση. Επιθεώρηση ανανέωσης.
Επιμήκυνση θραύσης	ISO 527-1.2	Τουλάχιστον: 9	<i>mean</i> ελάχιστο 2.5	<i>mean</i> ελάχιστο 1.5	%	Αρχική επιθεώρηση. Επιθεώρηση ανανέωσης.
Μέγιστη καμπτική αντοχή	ISO 178	Τουλάχιστον: 5	<i>mean</i> ελάχιστο 100	<i>mean</i> ελάχιστο 80	<i>MPa</i>	Αρχική επιθεώρηση.
Συντελεστής κάμψης	ISO 178	Τουλάχιστον: 5	<i>msv</i> ελάχιστο 2700	<i>msv</i> ελάχιστο 2700	<i>MPa</i>	Αρχική επιθεώρηση
Μέθοδος μέτρησης σκληρότητας <i>Barcol³</i>	EN 59 ASTM D2583	Μέτρηση σε όλα τα δείγματα ⁴⁾	<i>msv</i> ελάχιστο 35	<i>msv</i> ελάχιστο 35		Αρχική επιθεώρηση. Επιθεώρηση ανανέωσης.
Θερμοκρασία εκτροπής θερμότητας	ISO 75-2	Τουλάχιστον: 3	<i>mean</i> ελάχιστο 70	<i>mean</i> ελάχιστο 60	°C	Αρχική επιθεώρηση.

Απορρόφηση νερού ⁵	ISO 62	Τουλάχιστον: 3	<i>mean</i> μέγιστο 80	<i>mean</i> μέγιστο 100	<i>mg</i>	Αρχική επιθεώρηση.
<p>¹ Οποιοδήποτε χρήση άλλου προτύπου θα πρέπει πρώτα να εγκριθεί από τον νηογνώμονα.</p> <p>² Δοκίμια για δοκιμασία εφελκυσμού: ISO 527-2/1A or 1B/(1 - 5); Δοκίμια για δοκιμασία 1A ή 1B και ταχύτητα τεστ 1 με 5 mm/min.</p> <p>³ Η ρητίνη μπορεί να αποκλίνει από αυτές τις τιμές, υπό την προϋπόθεση ότι έχει μια ελάχιστη τιμή 30 και ο κατασκευαστής μπορεί να αποδείξει την επαρκή σκλήρυνση.</p> <p>⁴ Η μέθοδος μέτρησης σκληρότητας <i>Barcol</i> θα πρέπει να μετράται σε κάθε δείγμα και θα πρέπει να αντιστοιχεί με την τιμή του κατασκευαστή.</p> <p>⁵ Δείγμα για τεστ 50 x 50 x 4 mm ($\pm 1 \times 1 \times 0.2$). Απεσταγμένο νερό. Χρόνος έκθεσης 28 ημέρες σε 23 °C. Η ρητίνη μπορεί να αποκλίνει από αυτές τις τιμές, υπό την προϋπόθεση ότι οι ιδιότητες γήρανσης είναι επαληθευμένες.</p> <ul style="list-style-type: none"> • msv= καθορισμένη τιμή του κατασκευαστή, επαληθευμένη να είναι εντός $\pm 10\%$ του μέσου όρου των αποτελεσμάτων του τύπου δοκιμασίας. • mean= καθορισμένη μέση τιμή του κατασκευαστή, με βάση τουλάχιστον τα 2/3 των δοκιμασμένων δειγμάτων. 						

Για τις ρητίνες που θα χρησιμοποιηθούν ως μήτρα, ο νηογνώμονας αναφέρει πως οι πιστοποιημένες ρητίνες από πολυεστέρα, βινυλεστέρα και οι εποξικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς περαιτέρω αξιολόγηση. Στην περίπτωση χρήσης διαφορετικής μήτρας είναι απαραίτητη η συγκατάθεση του νηογνώμονα. Ενδεικτικά αναφέρει πως ο πολυεστέρας βαθμού 1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο περίβλημα το κύτους του σκάφους σε περίπτωση απλού πολύστρωτου και στην εξωτερική επίστρωση ενός σύνθετου τύπου *sandwich*. Σε περίπτωση επιφάνειας πολύστρωτου στο εσωτερικού του σκάφους καθώς και για υπερκατασκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυεστέρες βαθμού 2. Βαθμός που λαμβάνει κάθε ρητίνη ορίζεται ανάλογα με τις ιδιότητες της από τον νηογνώμονα.

Ακόμα ο νηογνώμονας αναφέρει πως δεν συστήνει τη χρήση έντονων χρωματικών προσθέτων στη μήτρα εξαιτίας του αρνητικού αντίκτυπου που έχουν αυτά σε μελλοντικό έλεγχο αστοχιών.

Όσον αφορά τα *Gel coat* και τα *Top coat* θα πρέπει να βασίζονται σε πολυεστερική βάση και θα πρέπει να πληρούν τις προϋποθέσεις του πίνακα 2.25.

Πίνακας 2.25. Πρότυπα υλικών *Gel coat* και τα *Top coat* που ορίζει ο νηογνώμονας [18].

Ιδιότητα	Πρότυπα ¹	Απαιτήσεις	Ελάχιστο επίπεδο επαλήθευσης
Επιμήκυνση Θραύσης ²	<i>ISO 527-1.2</i> ³	Ελάχιστο 2.0%	Αρχική εκτίμηση <i>DNV GL</i> Αλλαγή προδιαγραφών
Επικάλυψη	-	Ολοκληρωτική επικάλυψη θα πρέπει να επιτευχθεί με ως μέγιστο πάχος τα 400 mm πολυμερισμένης ρητίνης	Αρχική εκτίμηση <i>DNV GL</i> Αλλαγή προδιαγραφών
<p>¹ Οποιαδήποτε χρήση άλλου προτύπου θα πρέπει πρώτα να εγκριθεί από τον νηογνώμονα.</p> <p>² Το τεστ της επιμήκυνσης θα πρέπει να πραγματοποιείται για <i>gel coat / top coat</i> τα οποία περιέχουν περισσότερο από 15% μεταλλικά στοιχεία και άλλα πληρωτικά μέσα.</p> <p>³ Το δοκίμιο προς εξέταση θα πρέπει να κατασκευάζεται από βασική ρητίνη, να επικαλύπτεται με σκληρυμένο <i>gelcoat</i> πάχους 400 μm σε κάθε πλευρά και να έχει σκληρυνθεί σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο [4.1]</p>			

Πραγματοποιείται ιδιαίτερη αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πυρήνας με τα ελάχιστα μηχανικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχουν όπως φαίνονται στον πίνακα 2.26.

Πίνακας 2.26. Ελάχιστα μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών πυρήνα σύμφωνα με τον νηογνώμονα [18].

Κατασκευαστικό στοιχείο	Αντοχή πυρήνα (MPa)	
	Αντοχή στη διάτμηση	Αντοχή στην συμπίεση
Πυθμένας, πλάγια και πρύμνη κάτω από την χαμηλότερη ίσαλο ή το <i>chine</i> (όποιο είναι ψηλότερα)	0.8	0.9
Πλάγια πλοίου και πρύμνης πάνω από την χαμηλότερη ίσαλο ή από το <i>chine</i> (όποιο είναι υψηλότερα)	0.8	0.9
Καταστρώματα εκτεθειμένα στον καιρό που δεν προορίζονται για φορτίο	0.5	0.6
Κατάστρωμα φορτίου	0.8	0.9
Κατάστρωμα ενδιαίτησης	0.5	0.6
Κατασκευαστικά / υδατοστεγείς φρακτές / Διπύθμενα	0.5	0.6
Υπερκατασκευές	0.5	0.6
Φρακτή δεξαμενών	0.5	0.6

Καίρια μηχανικά στοιχεία που ο νηογνώμονας ορίζει να ελέγχονται με ευθύνη του ναυπηγείου σε θερμοκρασία δωματίου ή ιδανικά σε θερμοκρασία λειτουργίας, πριν εγκριθούν τα τελικά σχέδια του σκάφους, δίνονται στον πίνακα 2.27.

Πίνακας 2.27. Καίρια μηχανικά στοιχεία που θα πρέπει να ελεγχθούν πριν την εκκίνηση της κατασκευής [18].

Στοιχείο	Ιδιότητες
Πολύστρωτα και <i>sandwich</i>	Εφελκυστική αντοχή
	Αντοχή στην συμπίεση
	Αντοχή στην διάτμηση
Φλάντζες, δίκτυα ενισχυτικών, ενισχυτικά	Εφελκυστική αντοχή

	Αντοχή στην συμπίεση
Δίκτυα ενισχυτικών, ενισχυτικά	Αντοχή στην διάτμηση
Η σύνδεση μεταξύ πυρήνα και των ενισχύσεων των πάνελ τύπου <i>sandwich</i>	Αντοχή στην διάτμηση
Η διατμητική (στο επίπεδο) αντοχή μπορεί να υπολογιστεί εναλλακτικά, από δεδομένα της δοκιμασίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό και σε συμπίεση στην κατεύθυνση της ίνας χρησιμοποιώντας τη θεωρία πολύστρωτων.	

Κατά την διάρκεια κατασκευής ο νηογνώμονας ορίζει ότι πρέπει να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθοι έλεγχοι που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα 2.28, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ορθή πορεία της κατασκευής.

Πίνακας 2.28. Καίρια μηχανικά στοιχεία που θα πρέπει να ελεγχθούν κατά την διάρκεια της κατασκευής [18].

Περιοχή	Έλεγχος
Πυθμένας γάστρας, <i>Sandwich</i>	Δοκιμασία εφελκυσμού στην εξωτερική στρώση του <i>sandwich</i>
Πυθμένας γάστρας, <i>single skin</i> πολύστρωτα	Δοκιμασία εφελκυσμού στο πάνελ του πυθμένα
Κύριο κατάστρωμα, <i>Sandwich</i>	Δοκιμασία εφελκυσμού στην εξωτερική στρώση του <i>sandwich</i>
Κύριο κατάστρωμα, <i>single skin</i> πολύστρωτα	Δοκιμασία εφελκυσμού για το πάνελ
Σε ένα από τα κύρια διαμήκη ή εγκάρσια ενισχυτικά	Δοκιμασία εφελκυσμού για φλάντζες
Πυθμένας γάστρας, <i>Sandwich</i>	Δοκιμασία κάμψης ή έλεγχος πάχους

Τα πειράματα που θα διεξαχθούν για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να συμμορφώνονται με τα πρότυπα που αναφέρονται στον πίνακα 2.29.

Πίνακας 2.29. Έλεγχοι που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν στα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν [18].

Ιδιότητες	Έλεγχος	Σχόλιο
Συντελεστής / αντοχή σε εφελκυσμό σε πολυαξονικό πολύστρωτο	ISO 527-4 δείγμα τύπου 3	Πολλαπλών διευθύνσεων ύφασμα
	(ASTM D638-10 για επίπεδο δοκίμιο)	Για πολύστρωτα με ενίσχυση
Συντελεστής / αντοχή σε εφελκυσμό σε πολύστρωτο μονής διεύθυνσης	ISO 527-5 δείγμα τύπου A	για δοκιμασία παράλληλα στις ίνες
	ISO 527-5 δείγμα τύπου B	για δοκιμασία κάθετα στην διεύθυνση της ίνας
	(ASTM D3039 ευθύγραμμο δοκίμιο)	για πολύστρωτα με συνεχείς ίνες
Συντελεστής /αντοχή συμπίεσης του πολύστρωτου	ISO 14126 δείγμα τύπου B1; Μέθοδος 1	Φόρτιση του δείγματος με δυνάμεις διάτμησης
	ASTM D3410	για πολύστρωτα με συνεχείς ίνες
Συντελεστής / αντοχή διάτμησης στο επίπεδο του πολύστρωτου	ISO 14129	η συνηθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται
	(ASTM D4255)	Για όλα τα πολύστρωτα
Συντελεστής / αντοχή διάτμησης για υλικά πυρήνα	ISO 1922	
	ASTM C273	Πραγματοποίηση δοκιμασίας εφελκυσμού
Διαστρωματική αντοχή διάτμησης (Interlaminar shear strength)	ISO 14130	Για <i>single skin</i> πολύστρωτα
	(ASTM D2344)	Για <i>single skin</i> πολύστρωτα
Ιδιότητες κάμψης του Sandwich	ASTM D7249	
Διατμητικές ιδιότητες σε εγκάρσια κατεύθυνση (Sandwich through-thickness shear properties)	ASTM C393	Το μήκος δοκού που χρησιμοποιείται στη δοκιμασία καθορίζεται από την αστοχία του πυρήνα σε διάτμηση
Καμπτική αντοχή πολύστρωτου και ακαμψία	ISO 178 ή ISO 14125	

Ορίζεται ελάχιστος αριθμός αποδεκτών δοκιμών ο οποίος θα πρέπει να είναι πάνω από πέντε, έτσι ώστε ο νηογνώμονας να αποδεχτεί την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Περιεκτικότητα κατά βάρος της ενίσχυσης

Ο νηογνώμονας για να μπορέσει να εξασφαλίσει την ποιότητα των κατασκευών θέτει όρια στην ελάχιστη ποσότητα ενισχύσεων που έχει κάθε στρώση ενός πολύστρωτου ή *Sandwich* με βάση τη σχέση 2.61 ή 2.62, λαμβάνοντας υπόψιν την περιοχή που θα χρησιμοποιηθεί το στοιχείο:

Για πολύστρωτα έχουμε:

Η ελάχιστη μάζα της ενίσχυσης θα είναι ίση με:

$$W = W_0(1 + k(L - 20)) \quad \text{για } L > 20 \text{ m} \quad (2.61)$$

$$W = W_0 \quad \text{για } L \leq 20 \text{ m} \quad (2.62)$$

όπου :

W = είναι η μάζα της ενίσχυσης ανά μονάδα επιφάνειας g/m^2 .

W_0, k = συντελεστές που δίνονται από πίνακες του νηογνώμονα στις περιπτώσεις που οι ενισχύσεις είναι από ίνες γυαλιού, άνθρακα και αραμιδίου. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να γίνεται ειδική μελέτη.

L = μήκος μεταξύ καθέτων.

Για *Sandwich* έχουμε:

Η ελάχιστη μάζα της ενίσχυσης θα είναι ίση με:

$$W \geq W_0(1 + k(L - 20)) \quad \text{για } L > 20 \text{ m} \quad (2.63)$$

$$W = W_0 \quad \text{για } L \leq 20 \text{ m} \quad (2.64)$$

Κριτήρια αστοχίας

Ως βασικό κριτήριο αστοχίας ο νηογνώμονας ορίζει τη μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί να δεχτεί το πολύστρωτο στη διαμήκη διεύθυνση της ίνας. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέγιστη επιτρεπτή τάση που μπορεί να δεχτεί.

Επίσης ο νηογνώμονας δίνει τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν και άλλα κριτήρια αστοχίας όπως είναι το κριτήριο *Tsai-Wu* ή άλλα συναφή. Για τα τελευταία, ορίζεται πως θα πρέπει να πραγματοποιηθούν πειραματικές δοκιμές για να προσδιοριστούν οι τιμές που χρειάζονται τηρώντας σε κάθε περίπτωση τα πρότυπα που έχουν οριστεί, δεδομένου ότι χρειάζονται περισσότερα στοιχεία για να εξασφαλίζεται η ορθή χρήση τους. Σε περίπτωση χρήσης κάποιου άλλου κριτηρίου αστοχίας από το ναυπηγείο, θα πρέπει πρώτα να εξασφαλίζεται η συναίνεση του νηογνώμονα.

Ο νηογνώμονας αναφέρει ενδεικτικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των βασικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική για την κατασκευή συνθέτων υλικών, όπως φαίνονται στον πίνακα 2.30.

Πίνακας 2.30. Ενδεικτικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων βασικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική για την κατασκευή σύνθετων υλικών [18].

			Ίνες				Μήτρα	
			E-γυαλί	Αραμίδιο	HS άνθρακας	HM άνθρακας	Πολυεστερική	Εποξική
Ειδικό βάρος	$[g/m^3]$	2.54	1.45	1.77	1.90	1.20	1.20	
			Ίνες				Μήτρα	
			E-γυαλί	Αραμίδιο	HS άνθρακας	HM άνθρακας	Πολυεστερική	Εποξική
Young's modulus	Παράλληλα στις ίνες	MPa	73000	130000	230000	370000	3000	2600
	Κάθετα στις ίνες	MPa	73000	5400	14000	9000		
Συντελεστής Διάτμησης		MPa	30000	12000	23000	20000	1140	960
Λόγος Poisson		-	0.18	0.35	0.27	0.23	0.316	0.35

Κατά τον σχεδιασμό ενός σκάφους που θα κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά, θα πρέπει αρχικά να θεωρηθεί πως οι δυνάμεις ασκούνται απευθείας στις ίνες οι οποίες θα πρέπει να είναι με τέτοιο τρόπο ευθυγραμμισμένες έτσι ώστε να δέχονται με τον βέλτιστο τρόπο τις φορτίσεις. Τα πολύστρωτα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα και συμμετρικά γιατί η ασυμμετρία στη γεωμετρία και σε μηχανικές ιδιότητες, όταν δεν είναι προμελετημένη, μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτα φαινόμενα. Το πάχος μιας ομάδας ινών οι οποίες έχουν την ίδια διεύθυνση σε ένα κατασκευαστικό στοιχείο δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν το 1.5 *mm*. Θα πρέπει να υπάρχει συνέχεια των μηχανικών ιδιοτήτων των κατασκευαστικών στοιχείων ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται οι γωνίες και οι απότομες αλλαγές στα στοιχεία αυτά.

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 3

3.1 Σκοπός- στόχοι

Σκοπός της πειραματικής εργασίας είναι η κατασκευή και αξιολόγηση δοκιμίων από σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές, με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων κατεργασίας. Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο υλικών του τμήματος ναυπηγών μηχανικών του ΠΑΔΑ υποβλήθηκαν σε πειραματικούς ελέγχους αντοχής σε εφελκυσμό, κάμψη, κρούση και δοκιμασία καύσης. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε χρήση του προγράμματος *ANSYS* [20], με στόχο τον προσδιορισμό της κατανομής των τάσεων και της παραμόρφωσης κατά τη δοκιμασία μονοαξονικού εφελκυσμού και τη δοκιμασία κάμψης στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν.

3.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε

Χρησιμοποιούμενα υλικά:

- Για τη συνεχή φάση (μήτρα) χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη *AMPREG 30* με σκληρυντή ταχείας λειτουργίας ή πολυεστερική ρητίνη *AROPOL G102 TA* (κατασκευάστρια εταιρεία *GURIT*), γενικής χρήσης για ναυτιλιακές κατασκευές. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εποξικής ρητίνης δίνονται στον πίνακα 3.1 και της πολυεστερικής ρητίνης στους πίνακες 3.2 και 3.3.
- Ως υλικό ενίσχυσης στην κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε υαλοϋφασμα *Aeroglass 390 g/m²*, απλής πλέξης (*plain weave*) από γυαλί τύπου E.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο συγκεκριμένη ποσότητα ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού (*glass bubbles*) τύπου K1, μέσου μεγέθους 115 μm και πυκνότητας 0.125 g/cm^3 της εταιρίας 3M.

Πίνακας 3.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά κατασκευαστή, για την εποξική ρητίνη έπειτα από πολυμερισμό αυτής.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	28 ημέρες στους 21°C	16 ώρες στους 50 °C	5 ώρες στους 70 °C	Πρότυπο
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_{g2} (°C)	59	77	85	ISO 11357 (DSC)
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_{g1} (°C)	-	74	88	ISO 6721 (DMA)
Πυκνότητα, ρ , (g/cm ³)	-	1.164	-	ISO 1183-1A
Γραμμική συστολή (Linear shrinkage) (%)	-	1.85	-	ISO 1183-1A
28 ημέρες εμφάνιση σε νερό, M_g , (διαστάσεις δοκιμίου 60 x 50 x 1 mm)	-	32.00	-	ISO 62
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή, σ_t (MPa)	48.7	80.4	79.5	ISO 527-2
Tensile modulus, E_t (GPa)	3.59	3.49	3.26	ISO 527-2
Εφελκυστική παραμόρφωση, ϵ_t (%)	1.80	4.40	7.55	ISO 527-2
3-point flexural modulus, σ_F (N/mm ²)	84.40	131.00	124.00	ISO 178
3-point flexural strength, E_F (GPa)	3.47	3.42	3.22	ISO 178
3-point flexural strain, ϵ_F , (%)	2.66	5.96	8.11	ISO 178

Πίνακας 3.2. Ιδιότητες πολυεστέρα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, σε υγρή μορφή.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΟΥΣ 23^o C	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΙΞΩΔΕΣ (από την μέθοδο <i>Brookfield RV2, 10 rpm</i>), (<i>mPas</i>)	1200.0	<i>ISO 2555</i>
ΙΞΩΔΕΣ (από την μέθοδο <i>cone&plate</i>), (<i>mPas</i>)	190.0	<i>ISO 2884</i>
Περιεκτικότητα σε Στυρένιο (%)	42.0	<i>SFS 4864</i>
Πυκνότητα (<i>Kg/dm³</i>)	1.1	<i>ISO 2811</i>
<i>GELTIME 1% MEKP-50</i> (<i>min</i>)	20.0	<i>D006</i>
Μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία (^o C)	115.0	<i>D006</i>

Πίνακας 3.3. Ιδιότητες πολυεστερικής ρητίνης μετά από τη ολοκλήρωση του πολυμερισμού (τα παρακάτω αποτελέσματα προέκυψαν από δοκίμιο με διαστάσεις 50 x 50 x 4 mm).

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή (<i>MPa</i>)	55.0	<i>ISO 527</i>
<i>Young's modulus</i> (<i>MPa</i>)	3600.0	<i>ISO 527</i>
Παραμόρφωση στη θραύση (%)	2.0	<i>ISO 527</i>
Μέγιστη καμπτική αντοχή (<i>MPa</i>)	100.0	<i>ISO 178</i>

Συντελεστής κάμψης (MPa)	4000.0	ISO 178
Heat deflection temperature (HDT) (°C)	68.0	ISO 75/2 (A)
Σκληρότητα (Barcol)	45.0	ASTM D2583
Απορρόφηση νερού σε 24 ώρες (mg/δοκίμιο)	19.0	ISO 62-80
Απορρόφηση νερού σε 28 ημέρες (mg/δοκίμιο)	90.0	ISO 62-80

Για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα / συσκευές:

- Για τη δοκιμασία σε εφελκυσμό χρησιμοποιήθηκε συσκευή *PHYWE (Material Testing Unit 17571.00)*.
- Για τον έλεγχο σε κάμψη χρησιμοποιήθηκε αναλογική συσκευή κάμψης τριών σημείων με τα επιβαλλόμενα φορτία να ασκούνται μέσω κατάλληλων βαρών.
- Για τη δοκιμασία κρούσης χρησιμοποιήθηκε κρουσίμετρο *Avery – Deninson*.

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων δοκιμασίας εφελκυσμού και κάμψης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα προγράμματα:

- Υπολογιστικό πρόγραμμα *ANSYS (Ansys for Students) [20]*.
- Σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros (version 5) [21]*.

3.3 Διαδικασία κατασκευής δοκιμών

Για την κατασκευή όλων των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ύφασμα γυαλιού τύπου E. Ως πρώτη περίπτωση μήτρας στα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε πολυεστερική ρητίνη *AROPOG G102 TA*. Ως δεύτερη περίπτωση μήτρας σε όμοια δοκίμια με αυτά που κατασκευάστηκαν με πολυεστερική μήτρα χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα εποξική ρητίνη *AMPREG 30*.

Για κάθε περίπτωση κατασκευάστηκαν δοκίμια σε μορφή πλάκας διαστάσεων 10 cm x 17 cm με το πάχος να διαμορφώνεται σε κάθε περίπτωση από τέσσερις

στρώσεις υφάσματος. Για την αποφυγή αλλοίωσης της πλέξης του υφάσματος πριν την κοπή οριοθετήθηκαν οι περιοχές κοπής με χαρτομανία, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1. Προετοιμασία ενισχυτικού υφάσματος για κοπή.

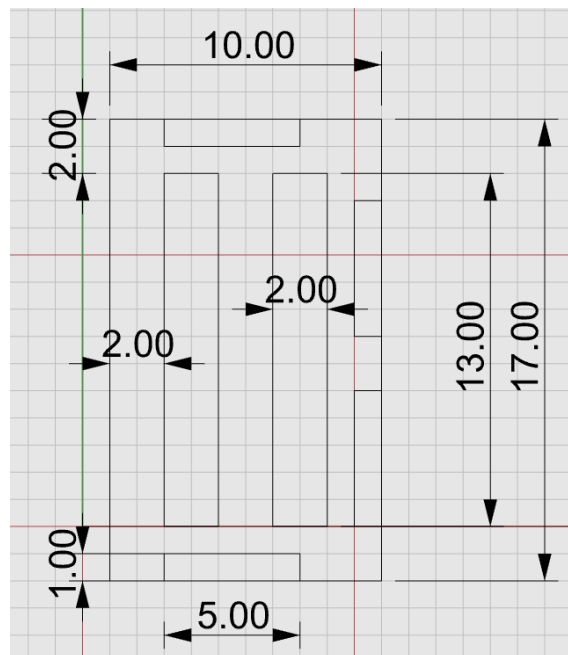
Μετά τον πολυμερισμό της μήτρας και αφού είχε περάσει τουλάχιστον μια εβδομάδα, με την βοήθεια ηλεκτρικού τροχού (*Dremel*) κόπηκαν τα τελικά δοκίμια. Η κοπή των δοκιμίων έγινε ακολουθώντας τις διαστάσεις που δίνονται στο σχήμα 3.1.

Για τη δοκιμασία εφελκυσμού και κάμψης, χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια με διαστάσεις $13\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ενώ αυτά για την κρούση χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια με διαστάσεις $5.5\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$. Τα κομμάτια από τις πλάκες που περίσσεψαν αποθηκεύτηκαν ώστε να χρησιμοποιηθούν στη δοκιμασία καύσης.

Οι μέθοδοι κατασκευής της κάθε πλάκας με τη χρήση πολυεστερικής ή εποξικής ρητίνης ως μήτρας αναφέρονται ακολούθως:

- Κατασκευάστηκε μία αρχική πλάκα με τη μέθοδο της χειρωνακτικής επίστρωσης (*hand lay-up*) σε συνθήκες περιβάλλοντος με την χρήση μήτρας από πολυεστέρα. Στο εξής αναφέρεται ως **PH**.
- Κατασκευάστηκε μία αρχική πλάκα με τη μέθοδο της χειρωνακτικής επίστρωσης (*hand lay-up*) σε συνθήκες περιβάλλοντος με την χρήση μήτρας από πολυεστέρα και με την προσθήκη ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού (*glass bubbles*) ως πρόσθετου. Στο εξής αναφέρεται ως **PHG**.

- Κατασκευάστηκε μία αρχική πλάκα με τη μέθοδο της χειρωνακτικής επίστρωσης (*hand lay-up*) σε συνθήκες περιβάλλοντος με την χρήση μήτρας από πολυεστέρα και με την χρήση της μεθόδου εφαρμογής κενού (*Vacuum bag*) κατά την διάρκεια του πολυμερισμού τις πρώτες 24 ώρες. Στο εξής αναφέρεται ως **PV**.



Σχήμα 3.1. Σχέδιο κατασκευής αρχικής πλάκας και των επιμέρους δοκιμίων για εφελκυσμό, κάμψη και κρούση. Οι τιμές που αναγράφονται δίνονται σε cm.



Εικόνα 3.2 Διαδικασία εμποτισμού ενίσχυσης.

Για την δημιουργία κενού (μέθοδος *Vacuum bag*) χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα υλικά:

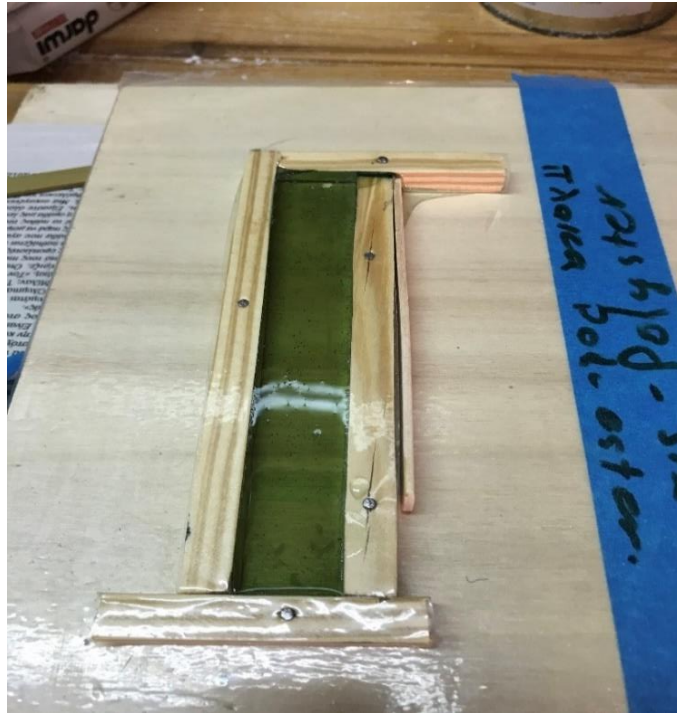
- Ηλεκτρική αντλία κενού.
- Αποκολλητικό ύφασμα (*Peel Ply*).
- Αφρώδες υλικό σε μορφή τσόχας (*Breather Bleeder*) για την κατακράτηση πλεονάζουσας ρητίνης (μόνο για την μέθοδο *Vacuum bag*).
- Αντικολλητικό φιλμ (μόνο για την μέθοδο *Vacuum bag*).
- Ελαστική μεμβράνη σφράγισης (σακούλα πολυαιθυλενίου).
- Εύκαμπτος πλαστικός σωλήνας πολυαιθυλενίου τύπου σπирάλ.
- Μεταλλική βαλβίδα ελέγχου της δημιουργίας κενού.



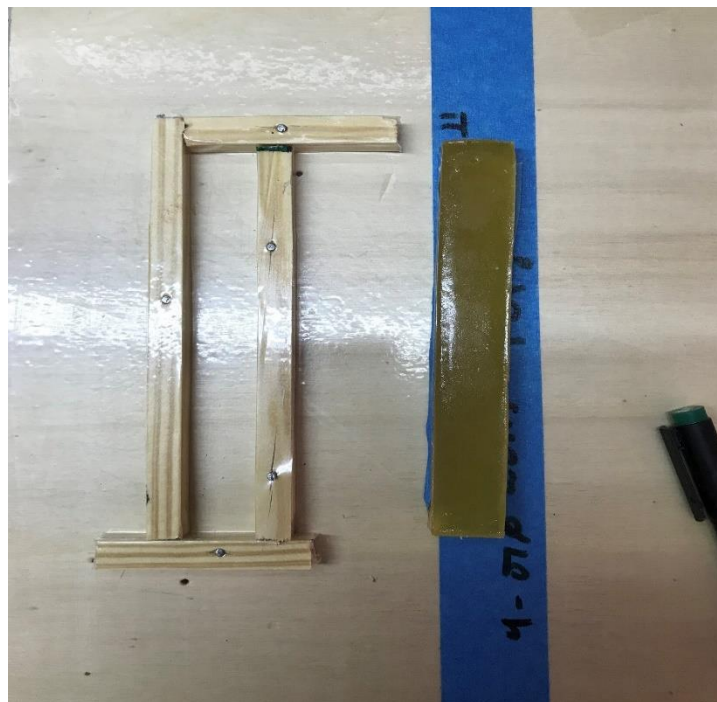
Εικόνα 3.3 Απεικόνιση της διαδικασίας κατασκευής της αρχικής πλάκας του σύνθετου, με τη μέθοδο σάκου κενού (*Vacuum bag*).

Στις περιπτώσεις της μεθόδου σάκου κενού, για να εξασφαλιστεί η μη παρουσία πλεονάζουσας ρητίνης, πραγματοποιήθηκε εμποτισμός του κάθε φύλλου ξεχωριστά σε συνθήκες περιβάλλοντος και στη συνέχεια αυτά συνδέθηκαν μαζί.

Τέλος κατασκευάστηκαν δύο πλάκες με την βοήθεια καλουπιού διαστάσεων $13\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ που αποτελούνταν η μια από πολυεστερική και η άλλη από εποξική ρητίνη, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.4 και 3.5, για να χρησιμοποιηθούν ως υλικό αναφοράς. Στο εξής αναφέρονται ως **P** και **E** αντίστοιχα.



Εικόνα 3.4 Κατασκευή πλάκας από πολυεστερική ρητίνη



Εικόνα 3.5 Κατασκευή πλάκας από εποξική ρητίνη

3.4 Μέθοδοι ελέγχου των δοκιμών

3.4.1 Δοκιμασία σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Για την μέτρηση της ασκούμενης δύναμης χρησιμοποιήθηκε δυναμόμετρο ακρίβειας $\pm 0.1 \text{ KN}$, ενώ για την μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό επιμηκυνσιόμετρο με ακρίβεια $\pm 0.1 \text{ mm}$. Για τη δοκιμασία, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαστάσεων $12 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 0.15 \text{ cm}$. Οι ακριβείς τιμές των διαστάσεων των δοκιμών δίνονται στους πίνακες 3.4 έως 3.9.



Εικόνα 3.6 Απεικόνιση διάταξης της δοκιμασίας ελέγχου σε εφελκυσμό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος.

3.4.2 Δοκιμασία Κάμψης

Η δοκιμασία κάμψης έγινε σύμφωνα με το πρότυπο D790 της ASTM. Χρησιμοποιήθηκε αναλογική συσκευή κάμψης 3 σημείων με την χρήση βαρών για την επιβολή του φορτίου στο μέσον του δοκιμίου. Η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης ήταν 8.0 cm . Η ασκούμενη δύναμη μετρήθηκε με ακρίβεια $\pm 0.01 \text{ N}$ με τη χρήση κατάλληλων βαρών και η παραμόρφωση (*deflexion*) μετρήθηκε με επιμηκυνσιόμετρο ακρίβειας $\pm 0.001 \text{ mm}$ για τον προσδιορισμό του βέλους κάμψης. Σε κάθε δοκίμιο η δύναμη που προκαλεί την κάμψη εφαρμόστηκε στο κέντρο του δοκιμίου (σε απόσταση $L/2$ από το ελεύθερο άκρο του δοκιμίου, όπου L το συνολικό μήκος). Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όμοια με αυτά της δοκιμασίας σε εφελκυσμό.



Εικόνα 3.7 Απεικόνιση διάταξης της δοκιμασίας ελέγχου σε κάμψη που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος.

3.4.3 Δοκιμασία κρούσης

Για τη δοκιμασία ελέγχου σε κρούση χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια από κάθε μέθοδο κατασκευής και εφαρμόστηκε η μέθοδος δοκιμασίας κρούσης κατά *Izod*. Η μάζα της σφύρας ήταν 2.5 kg και η ταχύτητά της κατά την κρούση ήταν 3.46 m/s.



Εικόνα 3.8 Απεικόνιση διάταξης ελέγχου σε κρούση κατά *Izod*, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος

3.4.4 Δοκιμή Καύσης (*Burn off test*)

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ενίσχυση, σε ρητίνη, καθώς και για τον προσδιορισμό των κενών, 3 προζυγισμένα δοκίμια από κάθε μέθοδο κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε, υποβλήθηκαν σε διαδικασία καύσης σε ειδικό φούρνο, που φαίνεται στην εικόνα 3.9, σε θερμοκρασία 600 °C για 50 *min* και ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας $\pm 0.0001 \text{ g}$ ώστε να προσδιοριστούν τα αντίστοιχα ποσοστά.



Εικόνα 3.9 Απεικόνιση διάταξης ελέγχου σε καύση που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος.

3.4.5 Προσομοίωση δοκιμασίας εφελκυσμού και κάμψης

Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε δοκιμασία εφελκυσμού και κάμψης με την βοήθεια του προγράμματος *ANSYS* [20]. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σχεδιάστηκαν σε ηλεκτρονική μορφή με τη χρήση του προγράμματος *Rhinoceros* [21] και ήταν αντίστοιχα με αυτά που κατασκευάστηκαν για τον πειραματικό έλεγχο. Οι διαστάσεις των δοκιμίων που σχεδιάστηκαν ήταν αντίστοιχες με αυτές που είχαν τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για τους πειραματικούς ελέγχους. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων ορίστηκαν με βάση τους τύπους 3.1 – 3.3, όπως φαίνεται ακολούθως, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τις πειραματικές δοκιμασίες.

Μέτρο ελαστικότητας στη διαμήκη διεύθυνση για σύνθετο υλικό ενισχυμένο με συνεχή και ευθυγραμμισμένη ίνα υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (3.1)$$

Μέτρο ελαστικότητας στη εγκάρσια διεύθυνση για σύνθετο υλικό ενισχυμένο με συνεχή και ευθυγραμμισμένη ίνα υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (3.2)$$

Αντοχή σε (εφελκυσμό) στη διαμήκη διεύθυνση για συνεχές και ευθυγραμμισμένο υλικό με ενίσχυση ίνας υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\sigma_{cl} = \sigma_m (1 - V_f) + \sigma_f V_f \quad (3.3)$$

όπου

V_m : Ποσοστό περιεκτικότητας μήτρας στο σύνθετο κατ' όγκο.

V_f : Ποσοστό περιεκτικότητας υφάσματος στο σύνθετο κατ' όγκο.

E_m : Μέτρο ελαστικότητας μήτρας.

E_f : Μέτρο ελαστικότητας υφάσματος.

σ_m : Ασκούμενη τάση στη μήτρα.

σ_f : Ασκούμενη τάση στο υαλοϋφασμα.

Για την πραγματοποίηση ορισμένων αρχικών δοκιμαστικών προσομοιώσεων της μηχανικής συμπεριφοράς σχεδιάστηκε σε ηλεκτρονική μορφή δοκίμιο από ίνες γυαλιού τύπου E, διαστάσεων αντίστοιχων με αυτές των δοκιμίων που μελετήθηκαν στο εργαστήριο. Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε δοκιμασίες μονοαξονικού εφελκυσμού και κάμψης με την βοήθεια του προγράμματος ANSYS. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το *Component system ACP (Pre)* και το *Analysis system Static structural* [20]. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου ορίστηκαν με βάση τις ελάχιστες τιμές που ορίζει ο νηογνώμονας *Lloyds* για τον τύπο ίνας E, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.21. Προκαταρκτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρατίθενται στο παράρτημα A.

3.5 Πειραματικές δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων

Για όλα τα δοκίμια μετρήθηκε το μήκος, το πλάτος, το πάχος και η μάζα τους, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων κατασκευής. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων που μετρήθηκαν και τα αποτελέσματα από του υπολογισμού προσδιορισμού της πυκνότητας παρατίθενται στους πίνακες 3.4 – 3.9.

Για τον ευκολότερο προσδιορισμό της κάθε μεθόδου κατεργασίας ακολουθήθηκε ο παρακάτω συμβολισμός:

- **EH:** Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη ως μήτρα με τη μέθοδο χειρωνακτικής επίστρωσης.
- **EHG:** Δοκίμιο κατασκευασμένο με τη μέθοδο χειρωνακτικής επίστρωσης, από εποξική ρητίνη ως μήτρα και με προσθήκη ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού.
- **EV:** Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη με τη μέθοδο σάκου κενού.
- **PH:** Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη ως μήτρα με τη μέθοδο χειρωνακτικής επίστρωσης.
- **PHG:** Δοκίμιο κατασκευασμένο με τη μέθοδο χειρωνακτικής επίστρωσης, από πολυεστερική ρητίνη ως μήτρα και με προσθήκη ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού.
- **PV:** Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη με τη μέθοδο σάκου κενού.

Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά δοκιμών κατασκευασμένων με εποξική ρητίνη ενισχυμένα με υαλοϋφασμα και προσθήκη ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού (EHG).

Μέθοδος Κατεργασίας:	Χειρωνακτική επίστρωση				
Δοκίμιο	1	2	3	4	5
Μήκος (cm)	12.565	12.540	5.000	5.000	5.000
Πλάτος (cm)	1.960	2.010	1.000	1.045	1.135
Πάχος (cm)	0.150	0.140	0.130	0.135	0.130
Μάζα (g)	5.1091	5.1026	1.0130	1.0068	1.1307
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.383	1.446	1.558	1.427	1.533

Πίνακας 3.5. Χαρακτηριστικά δοκιμών εποξικής μήτρας με τη μέθοδο *Vacuum bag* (EV).

Μέθοδος Κατεργασίας:	<i>Vacuum bag</i>				
Δοκίμιο	1	2	3	4	5
Μήκος (cm)	12.600	12.670	4.930	4.930	4.930
Πλάτος (cm)	2.050	2.065	1.150	0.950	1.090
Πάχος (cm)	0.150	0.150	0.130	0.130	0.125
Μάζα (g)	5.0977	5.5621	1.1206	0.9671	1.1104
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.316	1.417	1.520	1.588	1.653

Πίνακας 3.6. Χαρακτηριστικά δοκιμών κατασκευασμένων από πολυεστερική μήτρα και εφαρμογή κενού (*Vacuum bag*) (**PV**).

Μέθοδος Κατεργασίας:	<i>Vacuum bag</i>				
Δοκίμιο	1	2	3	4	5
Μήκος (<i>cm</i>)	12.415	12.420	5.000	4.995	4.940
Πλάτος (<i>cm</i>)	2.100	2.000	1.000	1.130	0.940
Πάχος (<i>cm</i>)	0.130	0.130	0.125	0.120	0.120
Μάζα (<i>g</i>)	4.9409	4.753	0.9814	1.075	0.0763
Πυκνότητα (<i>g/cm³</i>)	1.458	1.472	1.570	1.587	0.137

Πίνακας 3.7. Χαρακτηριστικά δοκιμών κατασκευασμένων από εποξική μήτρα (**EH**).

Μέθοδος Κατεργασίας:	Χειρωνακτική επίστρωση				
Δοκίμιο	1	2	3	4	5
Μήκος (<i>cm</i>)	12.570	12.630	4.995	4.915	4.875
Πλάτος (<i>cm</i>)	2.050	1.910	1.500	1.090	1.225
Πάχος (<i>cm</i>)	0.135	0.150	0.140	0.135	0.145
Μάζα (<i>g</i>)	5.2699	5.1918	1.0358	1.07	1.2438
Πυκνότητα (<i>g/cm³</i>)	1.515	1.435	0.987	1.479	1.436

Πίνακας 3.8. Χαρακτηριστικά δοκιμών κατασκευασμένων από πολυεστερική μήτρα (**PH**).

Μέθοδος Κατεργασίας:	Χειρωνακτική επίστρωση				
Δοκίμιο	1	2	3	4	5
Μήκος (<i>cm</i>)	12.600	12.600	5.135	5.100	5.085
Πλάτος (<i>cm</i>)	2.050	2.080	1.130	1.180	1.130
Πάχος (<i>cm</i>)	0.140	0.145	0.150	0.140	0.145
Μάζα (<i>g</i>)	5.0996	5.3481	1.1108	1.2364	1.1797
Πυκνότητα (<i>g/cm³</i>)	1.410	1.407	1.276	1.468	1.416

Πίνακας 3.9. Χαρακτηριστικά δοκιμίων κατασκευασμένων από πολυεστερική μήτρα και προσθήκη ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού (**PHG**).

Μέθοδος Κατεργασίας:	Χειρωνακτική επίστρωση				
Δοκίμιο	1	2	3	4	5
Μήκος (<i>cm</i>)	12.615	12.600	4.975	5.000	4.970
Πλάτος (<i>cm</i>)	2.130	2.100	1.130	1.030	1.040
Πάχος (<i>cm</i>)	0.130	0.140	0.135	0.135	0.135
Μάζα (<i>g</i>)	5.441	5.5793	1.0962	1.107	1.0621
Πυκνότητα (<i>g/cm³</i>)	1.558	1.506	1.444	1.592	1.522

Κεφάλαιο 4

4.1 Αποτελέσματα

4.1.1 Αποτελέσματα δοκιμασίας εφελκυσμού

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης ($\sigma - \varepsilon$) που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, ενώ τα δοκίμια μετά από την ολοκλήρωση του ελέγχου απεικονίζονται στην εικόνα 4.1. Η ασκούμενη τάση εφελκυσμού υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 4.1 και η παραμόρφωση με βάση την εξίσωση 4.2. Τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης δίνονται στα σχήματα 4.1 έως 4.8.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

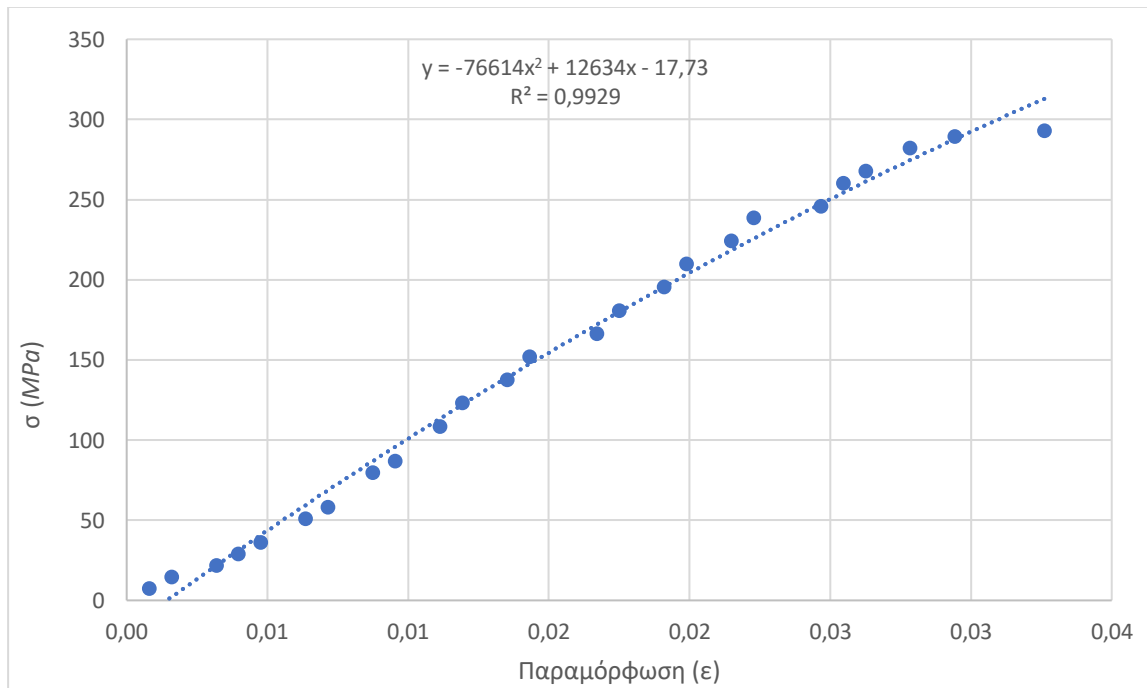
όπου

F : Αξονικό φορτίο που επιβλήθηκε στο δοκίμιο.

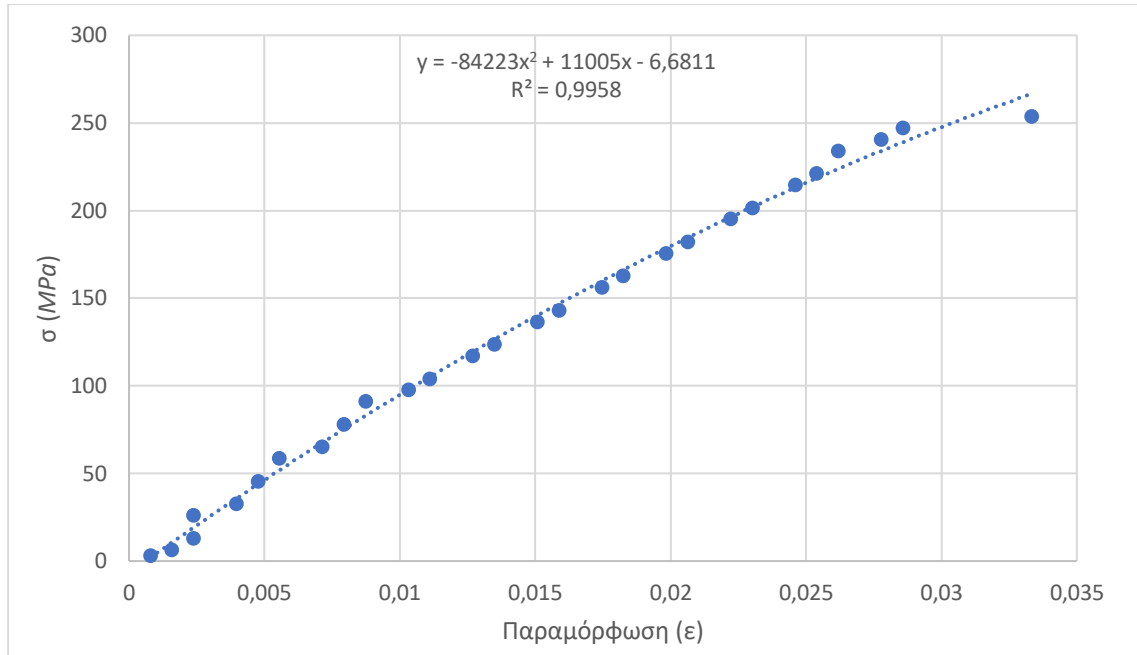
A : Αρχικό εμβαδόν διατομής.

ΔL : Μεταβολή του μήκους του δοκιμίου.

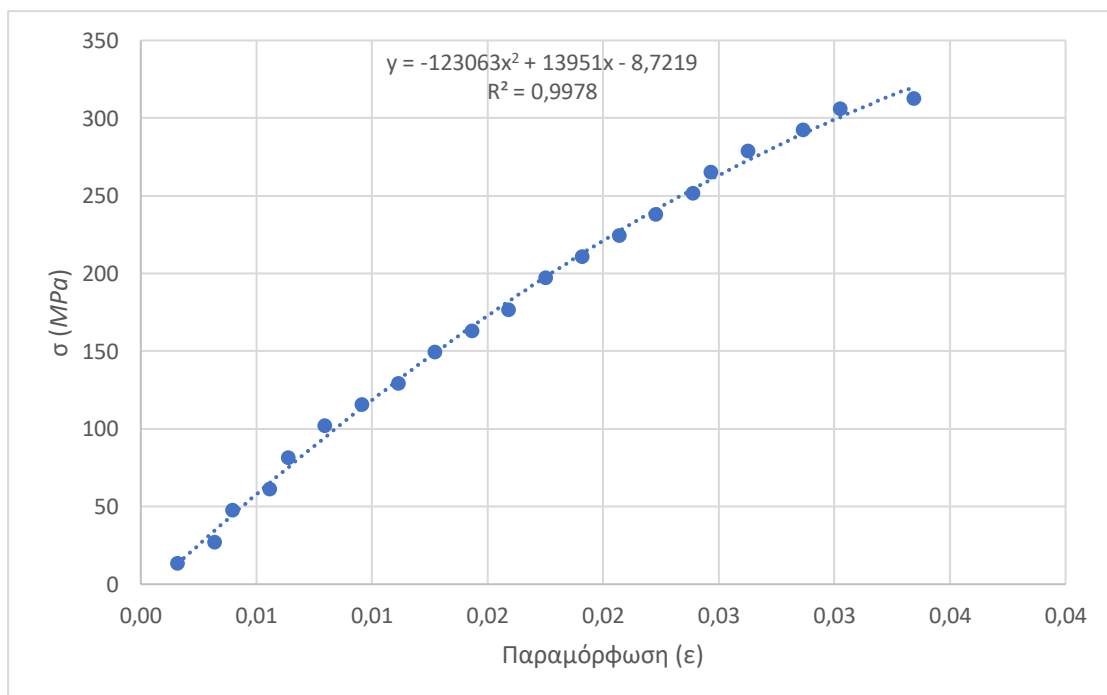
L_0 : Αρχικό μήκος δοκιμίου.



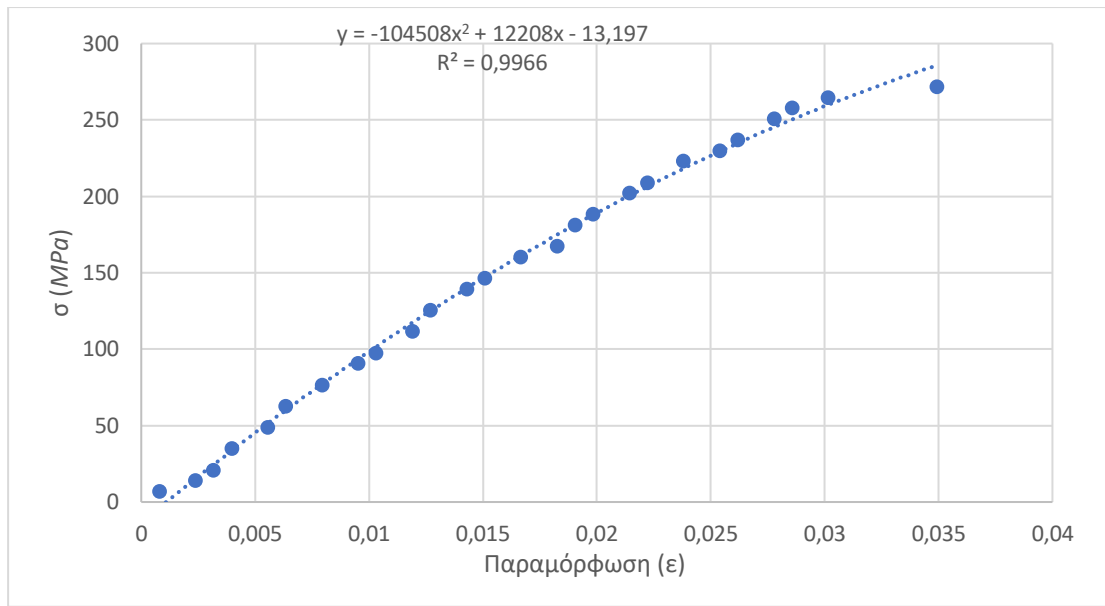
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για το δοκίμιο *EH*.



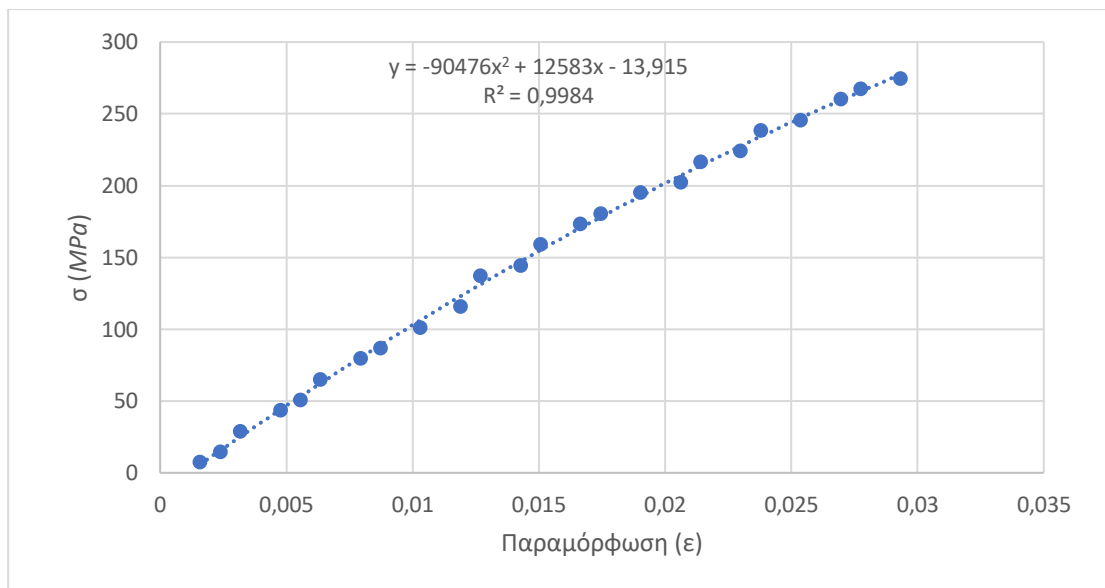
Σχήμα 4.2. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για το δοκίμιο *EV*.



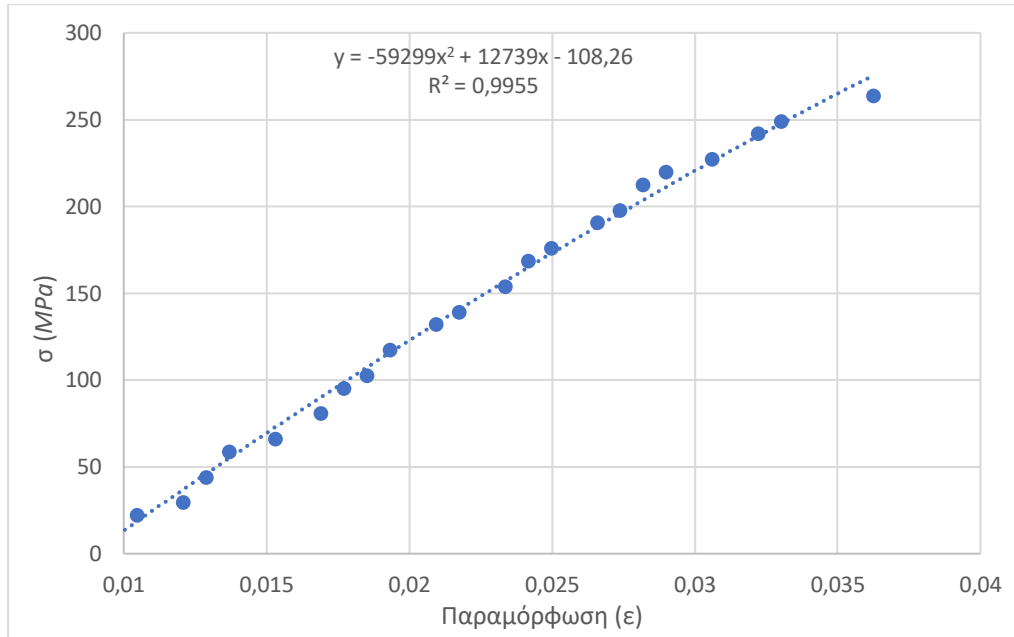
Σχήμα 4.3. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για το δοκίμιο *EHG*.



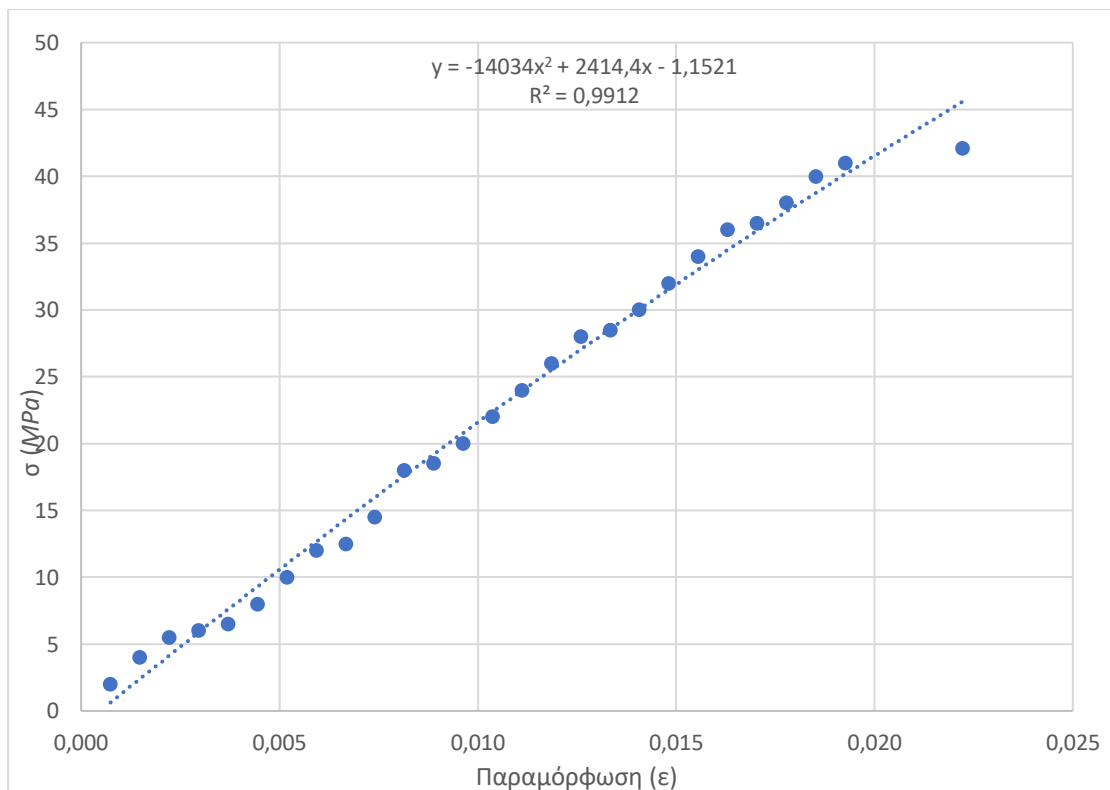
Σχήμα 4.4. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για το δοκίμιο *PH*.



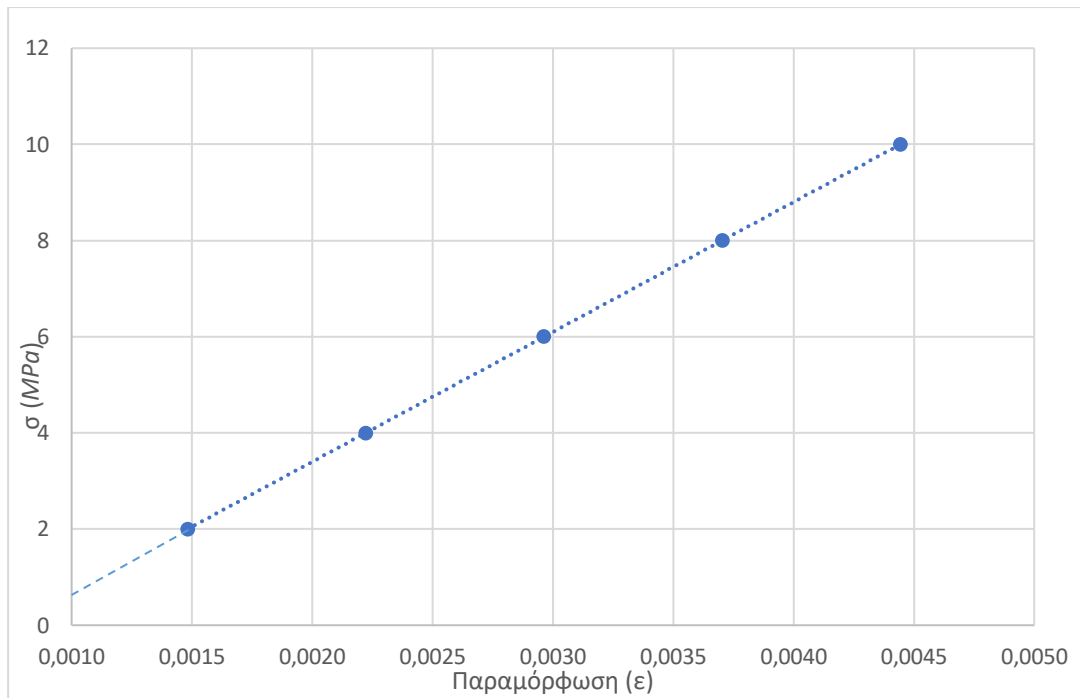
Σχήμα 4.5. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για το δοκίμιο *PHG*.



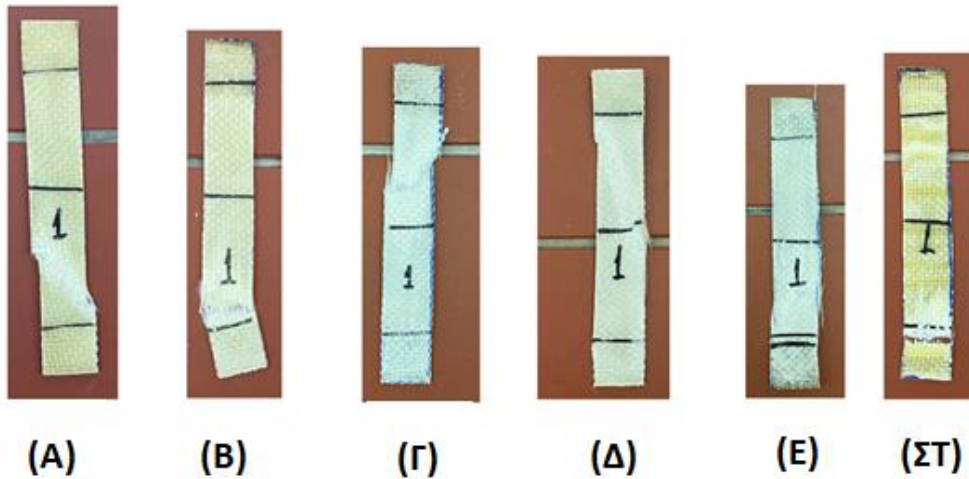
Σχήμα 4.6. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για το δοκίμιο PV.



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από εποξική ρητίνη.



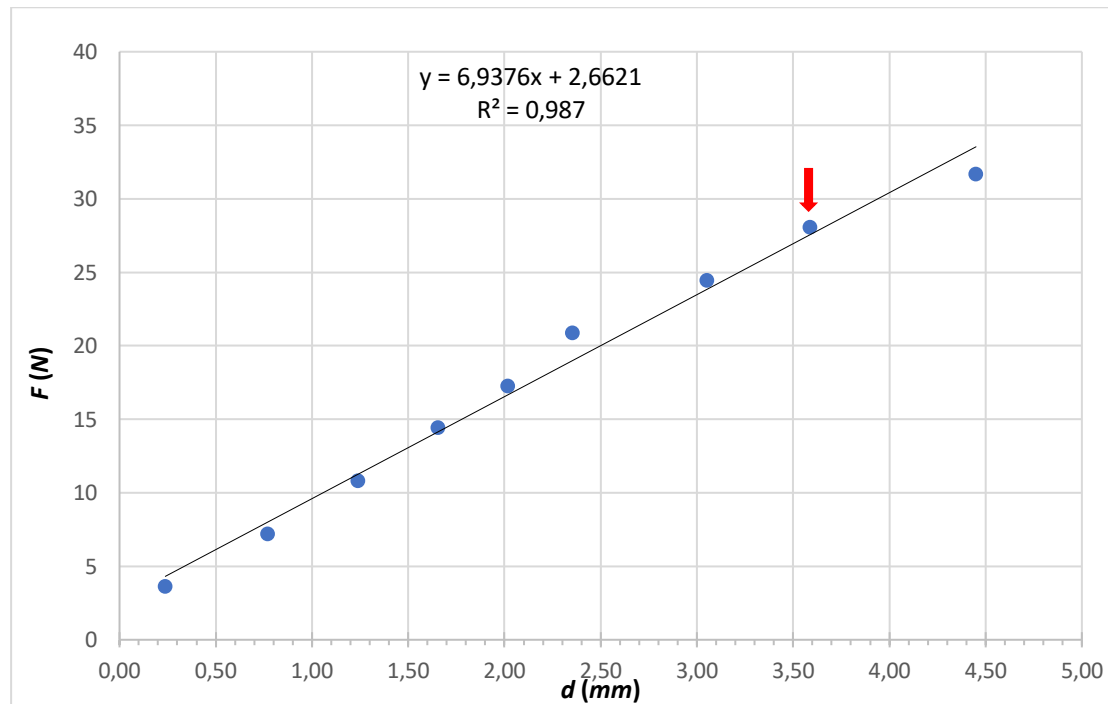
Σχήμα 4.8. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψε από τον έλεγχο εφελκυσμού για δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από πολυεστερική ρητίνη.



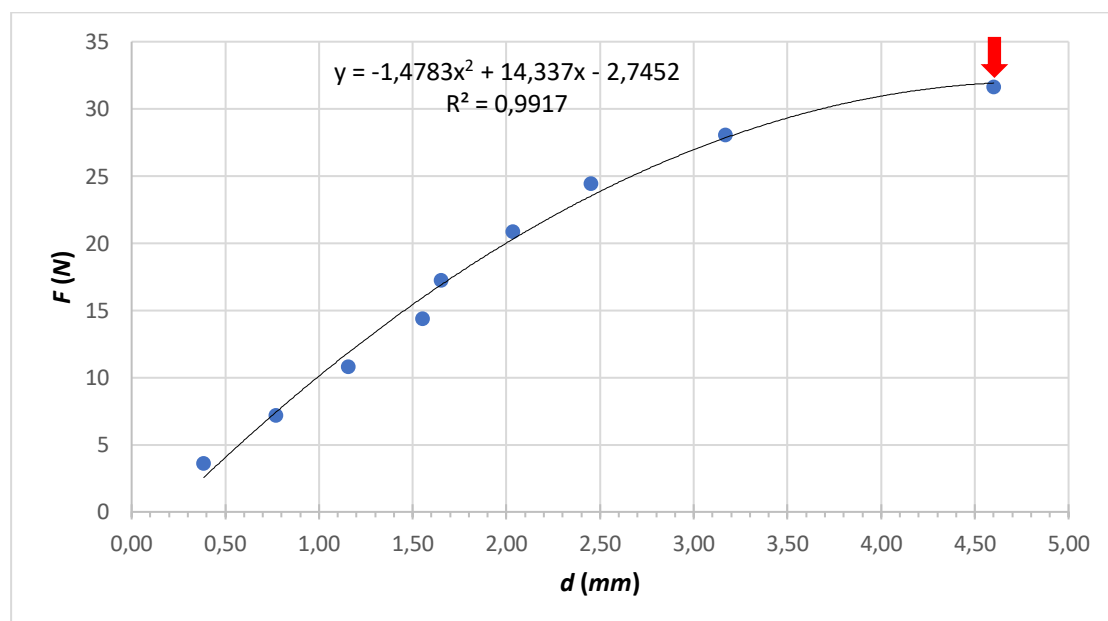
Εικόνα 4.1 (Α):Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη ως μήτρα έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε εφελκυσμό. (Β):Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη ως μήτρα και με προσθήκη κόκκων γυαλιού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε εφελκυσμό. (Γ):Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη ως μήτρα έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε εφελκυσμό. (Δ):Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη ως μήτρα και με προσθήκη κόκκων γυαλιού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε εφελκυσμό. (Ε):Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη και χρήση κενού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε εφελκυσμό. (ΣΤ):Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη και χρήση κενού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε εφελκυσμό.

4.1.2 Αποτελέσματα δοκιμασίας κάμψης τριών σημείων

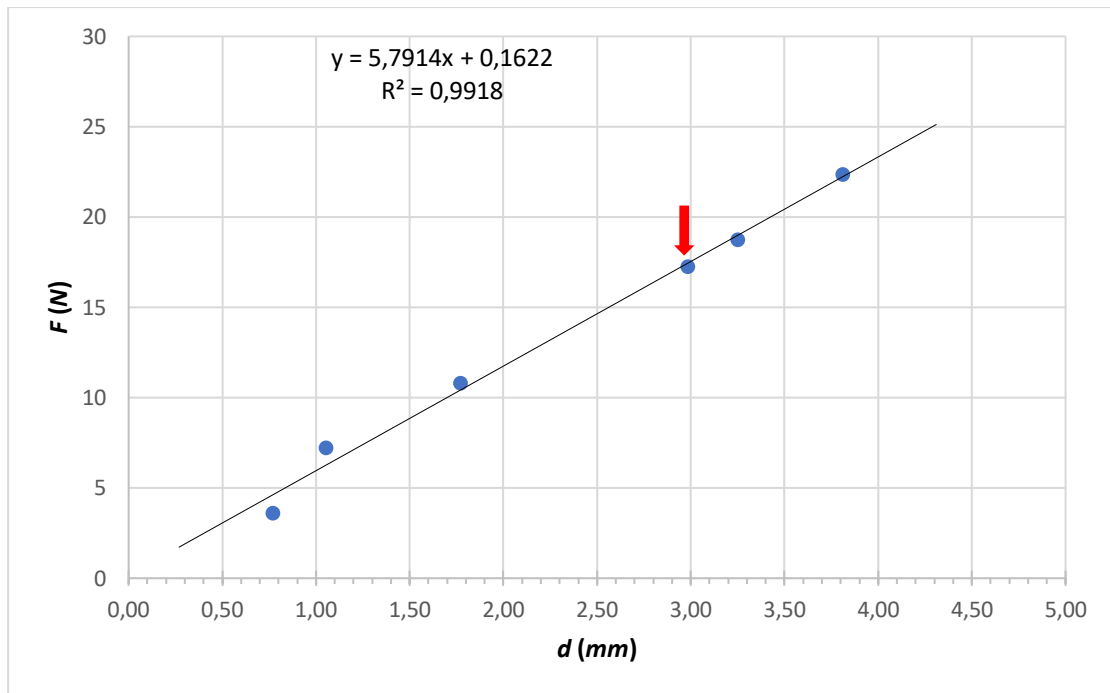
Τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης ($F - d$) φαίνονται στα σχήματα 4.9 – 4.14, ενώ τα δοκίμια μετά από την ολοκλήρωση του ελέγχου απεικονίζονται στην εικόνα 4.2. Σε κάθε διάγραμμα σημειώνεται με κόκκινο βέλος το σημείο στο οποίο παρατηρήθηκε η αρχική θραύση, αλλά όχι απαραίτητα η ολική αστοχία του δοκιμίου.



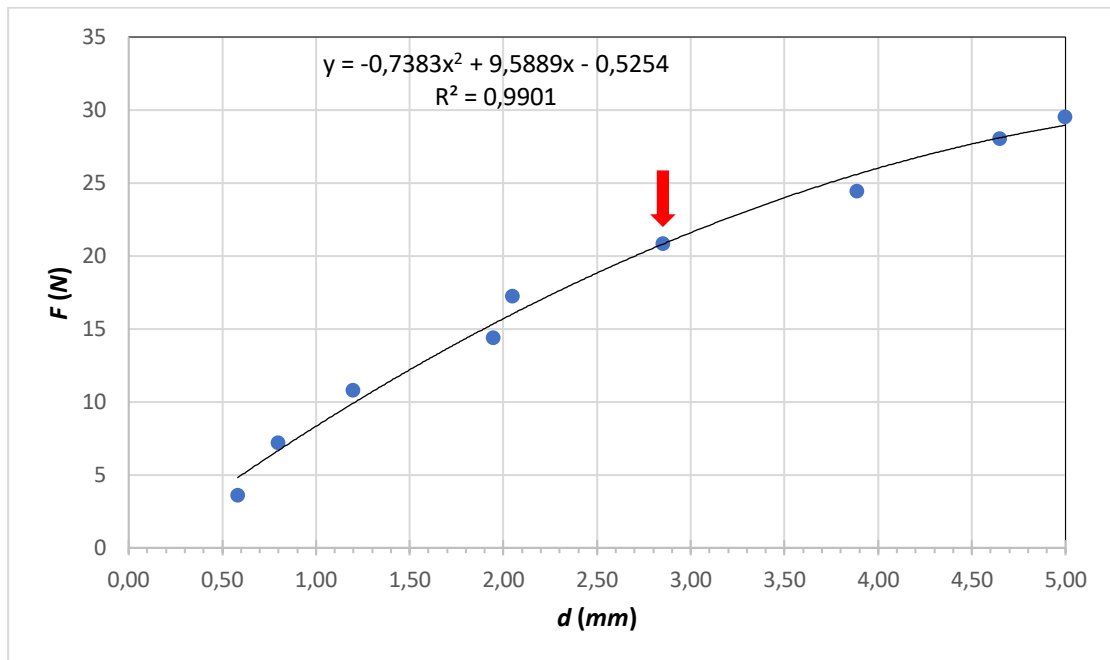
Σχήμα 4.9. Διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης που προέκυψε από τον έλεγχο κάμψης για το δοκίμιο EH.



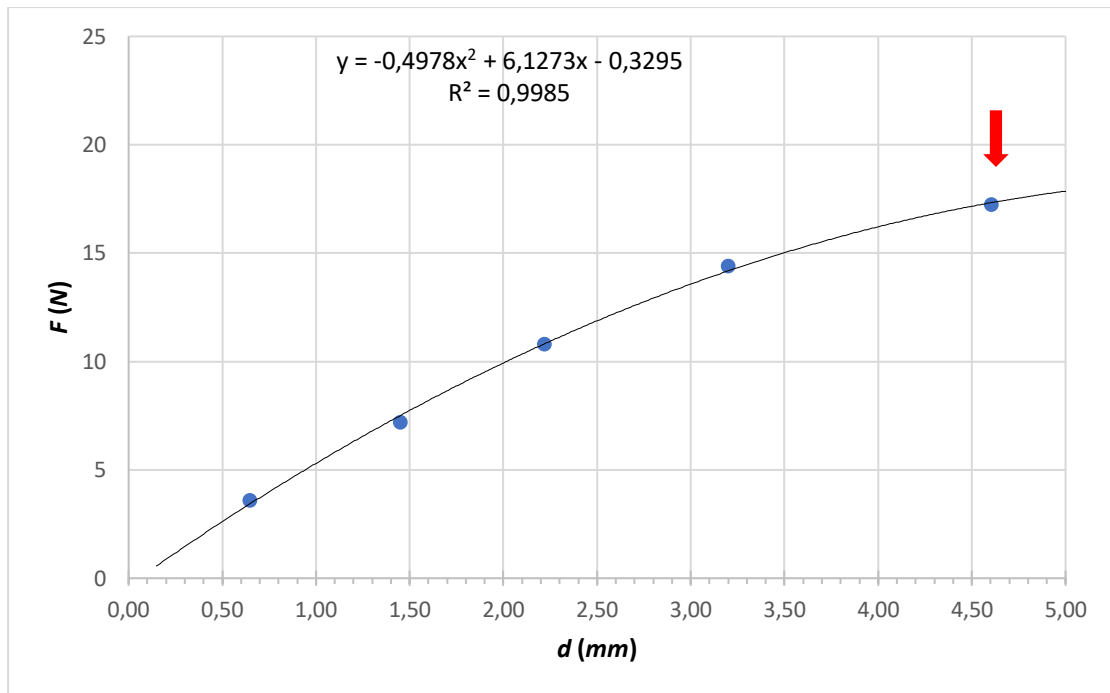
Σχήμα 4.10. Διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης που προέκυψε από τον έλεγχο κάμψης για το δοκίμιο EHG.



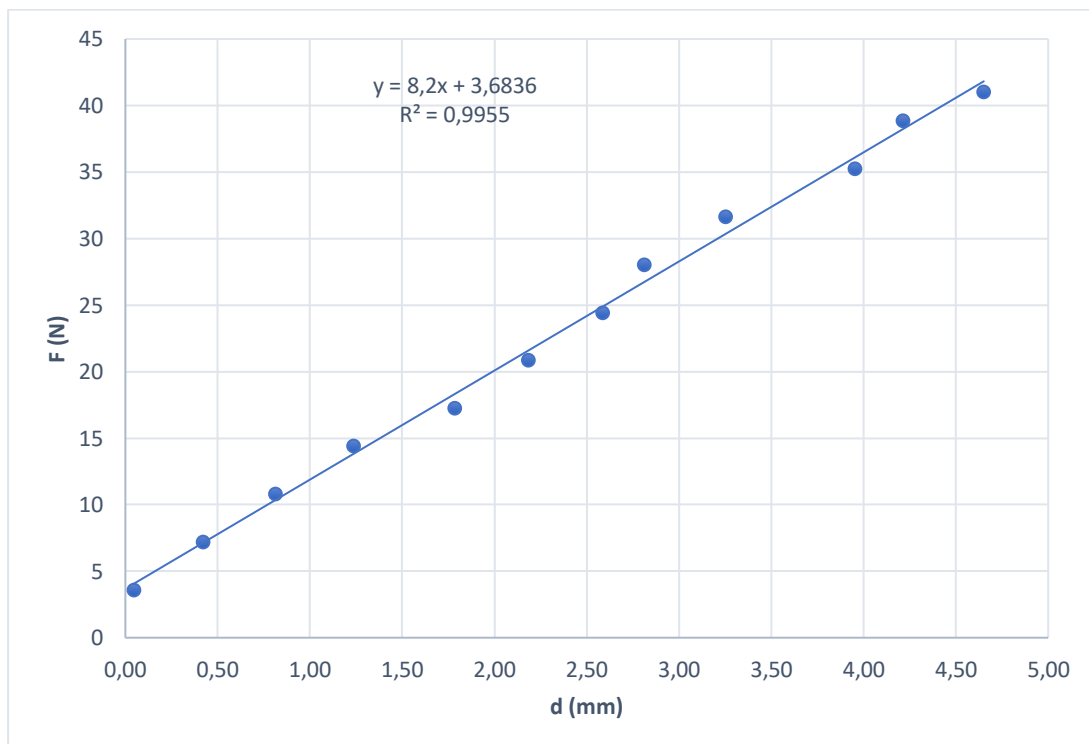
Σχήμα 4.11. Διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης που προέκυψε από τον έλεγχο κάμψης για το δοκίμιο *PH*.



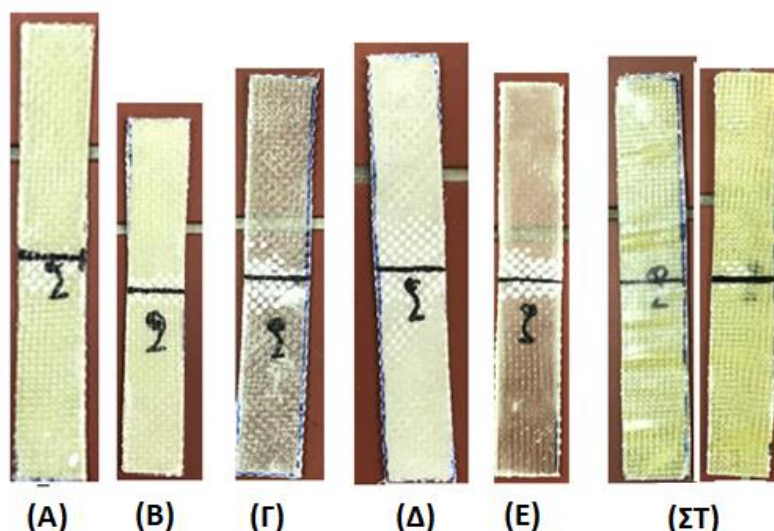
Σχήμα 4.12. Διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης που προέκυψε από τον έλεγχο κάμψης για το δοκίμιο *PHG*.



Σχήμα 4.13. Διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης που προέκυψε από τον έλεγχο κάμψης για το δοκίμιο *PV*.



Σχήμα 4.14. Διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης που προέκυψε από τον έλεγχο κάμψης για το δοκίμιο *EV*.



Εικόνα 4.2 (Α):Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη ως μήτρα έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε κάμψη. (Β):Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη ως μήτρα και με προσθήκη κόκκων γυαλιού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε κάμψη. (Γ):Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη ως μήτρα έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε κάμψη. (Δ):Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη ως μήτρα και με προσθήκη κόκκων γυαλιού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε κάμψη. (Ε):Δοκίμιο κατασκευασμένο από πολυεστερική ρητίνη και χρήση κενού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε κάμψη. (ΣΤ):Δοκίμιο κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη και χρήση κενού έπειτα από την διεξαγωγή ελέγχου σε κάμψη.

Από τα δεδομένα των διαγραμμάτων 4.9 έως 4.14 υπολογίστηκε το *modulus of rapture* (*MOR*) ως μέτρο της αντοχής του υλικού σε καμπτικές φορτίσεις, με βάση την σχέση 4.3.

$$MOR = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.3)$$

όπου

F: Δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο.

L: Απόσταση των σημείων στήριξης του δοκιμίου (*L* = 8.0 cm).

b: Πλάτος δοκιμίου.

h: Πάχος δοκιμίου.

Πίνακας 4.1. Αντοχή στην κάμψη.

ΔΟΚΙΜΙΟ – ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	<i>Modulus of rapture, MOR, (MPa)</i>
<i>EH</i>	78.3
<i>EHG</i>	96.4
<i>EV</i>	-
<i>PH</i>	47.3
<i>PHG</i>	60.8
<i>PV</i>	61.2

4.1.3 Αποτελέσματα δοκιμής κρούσης

Η δυσθραυστότητα των δοκιμών υπολογίστηκε από την σχέση 4.4 και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 4.2.

$$G_c = \frac{E_{απ}}{A} \quad (4.4)$$

όπου

$E_{απ}$: Απορροφούμενη ενέργεια (J)

A: Διατομή δοκιμίου (cm^2)

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα ελέγχου κρούσης για δοκίμια.

ΔΟΚΙΜΙΟ	Δυσθραυστότητα (J/cm^2)
<i>EH</i>	10.2
<i>EHG</i>	15.1
<i>EV</i>	9.3
<i>PH</i>	8.4
<i>PHG</i>	9.1
<i>PV</i>	5.9

4.1.4 Αποτελέσματα δοκιμασίας καύσης (*Burn off test*)

Η κατά βάρος περιεκτικότητα κάθε φάσης στα δοκίμια παρατίθενται στον πίνακα 4.3. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων από το πείραμα καύσης πραγματοποιήθηκε η ίδια μέτρηση σε δυο δοκίμια κάθε μεθόδου κατασκευής.

Πίνακας 4.3. Ποσοστό βάρους ενίσχυσης μήτρας και βάρος (σε g) ενίσχυσης, μήτρας και συνθέτου.

ΔΟΚΙΜΙΟ	w_f (%)	w_m (%)	m_f (g)	m_m (g)	m_c (g)
EH	58.1	41.9	0.61	0.44	1.05
EHG	56.6	43.4	0.59	0.45	1.04
EV	56.1	43.9	0.58	0.46	1.04
PH	58.2	41.8	0.70	0.50	1.20
PHG	58.2	41.8	0.64	0.46	1.10
PV	59.5	40.5	0.61	0.41	1.02

Για τον προσδιορισμό των κλασμάτων όγκου των κενών, της ενίσχυσης, και της μήτρας σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε χρήση των παρακάτω τύπων:

Το κλάσμα όγκου των κενών δίνεται από την σχέση:

$$V_v = 1 - \rho_c [(w_f/\rho_f) + (w_m/\rho_m)] \quad (4.5)$$

Το κλάσμα όγκου της ενίσχυσης δίνεται από την σχέση:

$$V_f = m_f \rho_m / (m_f \rho_m + m_m \rho_f) \quad (4.6)$$

Το κλάσμα όγκου της μήτρας δίνεται από την σχέση:

$$V_m = 1 - V_v - V_f \quad (4.7)$$

όπου:

V_c = το κλάσμα όγκου του σύνθετου.

Πίνακας 4.4. Κλάσματα όγκων κενού, ενίσχυσης και μήτρας στα δοκίμια.

ΔΟΚΙΜΙΟ	V_v	V_f	V_m
<i>EH</i>	0.130	0.370	0.501
<i>EHG</i>	0.026	0.356	0.619
<i>EV</i>	0.045	0.350	0.605
<i>PH</i>	0.273	0.401	0.326
<i>PHG</i>	0.177	0.400	0.423
<i>PV</i>	0.114	0.414	0.472

Πίνακας 4.5. % Ποσοστό όγκου κενών, ενίσχυσης και μήτρας στα δοκίμια.

ΔΟΚΙΜΙΟ	V_v (%)	V_f (%)	V_m (%)
<i>EH</i>	13.0	37.0	50.1
<i>EHG</i>	2.6	35.6	61.9
<i>EV</i>	4.5	35.0	60.5
<i>PH</i>	27.3	40.1	32.6
<i>PHG</i>	17.7	40.0	42.3
<i>PV</i>	11.4	41.4	47.2

4.1.5 Υπολογισμός μηχανικών ιδιοτήτων με βάση τους κανονισμούς του *Lloyds*.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του πίνακα 2.15, υπολογίστηκαν οι τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών **PH**, **PHG** και **PV** σύμφωνα με το νηογνώμονα *Lloyds*. Τα αποτελέσματα αναγράφονται στον πίνακα 4.6. Όσον αφορά τα αντίστοιχα

δοκίμια με εποξική μήτρα δεν ήταν δυνατή η πραγματοποίηση παρόμοιων υπολογισμών λόγω του ότι ο νηογνώμονας δεν ορίζει αντίστοιχη περίπτωση.

Πίνακας 4.6. Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων που προκύπτουν με βάση τις οδηγίες του νηογνώμονα *Lloyds* [15].

ΔΟΚΙΜΙΟ:	<i>PH</i>	<i>PHG</i>	<i>PV</i>
Κλάσμα βάρους της ενίσχυσης στο πολυστρωτο	0.5824	0.5816	0.5950
Μέγιστη εφελκυστική αντοχή (<i>MPa</i>)	223	223	228
<i>Tensile modulus (MPa)</i>	1748	1746	1787
Μέγιστη αντοχή στην συμπίεση (<i>MPa</i>)	159	159	161
<i>Compressive modulus (MPa)</i>	1781	1778	1833
Μέγιστη αντοχή στην διάτμηση (<i>MPa</i>)	85	85	86
<i>Shear modulus (MPa)</i>	333	333	335
Μέγιστη αντοχή στην κάμψη (<i>MPa</i>)	692	691	704
<i>Flexural modulus (MPa)</i>	2230	2227	2273

4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες 4.7 και 4.8, στους οποίους αναγράφονται όλα τα αποτελέσματα από τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει σύγκριση αυτών.

Πίνακας 4.7. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικού μέρους.

ΔΟΚΙΜΙΟ:	<i>EH</i>	<i>EHG</i>	<i>EV</i>	<i>PH</i>	<i>PHG</i>	<i>PV</i>	Εποξική ρητίνη	Πολυεστερική ρητίνη
Μέγιστη εφελκυστική τάση (<i>MPa</i>)	292.7	312.9	253.7	271.8	274.5	263.7	42.1	18.0
Μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση (%)	3.3	3.3	3.3	3.5	2.9	3.6	2.2	0.6
Δύναμη στην αρχή της θραύσης κατά τη δοκιμασία κάμψης (<i>N</i>)	28.1	31.7	-	17.3	20.9	17.3	-	-

Μήκος του βέλους κάμψης στην αρχή της θραύσης (mm)	3.6	4.6	-	3.0	2.9	4.6	-	-
MOR (MPa)	78.3	96.4	-	47.3	60.8	61.2	-	-
Δυσθραυστότητα, G_c (J/m ²)	10.2	15.1	9.3	8.4	9.1	5.9	-	-
V_V (%)	13.0	2.6	4.5	27.3	17.7	11.4	-	-
V_f (%)	37.0	35.6	35.0	40.1	40.0	41.4	-	-
V_m (%)	50.1	61.9	60.5	32.6	42.3	47.2	-	-

Πίνακας 4.8. Ποσοστιαία απόκλιση αποτελεσμάτων πειραματικού μέρους.

Δοκίμια προς σύγκριση:	<i>EH & EV</i>	<i>EH & EHG</i>	<i>EHG & EV</i>	<i>PH & PV</i>	<i>PH & PHG</i>	<i>PHG & PV</i>
Ποσοστιαία απόκλιση μέγιστης εφελκυστικής τάσης	13.3	6.9	18.9	3.0	1.0	3.9
Ποσοστιαία απόκλιση μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης	2.2	2.5	0.3	3.8	16.0	23.6
Ποσοστιαία απόκλιση ασκούμενης δύναμης στην αρχή της θραύσης κατά την δοκιμασία κάμψης	-	12.8	-	0.0	20.9	17.3
Ποσοστιαία απόκλιση μήκους του βέλους κάμψης στην αρχή της θραύσης	-	28.3	-	54.2	4.5	61.5
Ποσοστιαία απόκλιση του MOR	-	23.1	-	29.4	28.4	0.8
Ποσοστιαία απόκλιση δυσθραυστότητα	9.0	48.1	38.6	29.7	7.5	34.6
Ποσοστιαία απόκλιση V_V	65.1	80.1	75.2	58.2	35.3	35.5
Ποσοστιαία απόκλιση V_f	5.3	3.8	1.6	3.2	0.2	3.5
Ποσοστιαία απόκλιση V_m	20.7	23.5	2.2	44.9	29.8	11.6

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή, μελέτη και αξιολόγηση σύνθετων υλικών εποξικής ή πολυεστερικής μήτρας με ενισχυτικά υαλοϋφάσματα που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική, ώστε να διερευνηθεί η αξιοπιστία των βασικών μεθόδων κατεργασίας που εφαρμόζονται συνήθως σε ναυπηγικές κατασκευές.

Όσον αφορά τον όγκο των κενών η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη τιμή του V_V (13.0 % στην περίπτωση εποξικής μήτρας και 27.3 % στην περίπτωση πολυεστερικής μήτρας). Συνεπώς, η χρήση κενού (*Vacuum bag*) συνδυαζόμενη με την διαδικασία της επίστρωσης έχει θετικό αποτέλεσμα, καθώς βρέθηκε ότι προκαλεί μείωση του όγκου των κενών σε ποσοστό 65.1 % στην περίπτωση εποξικής ρητίνης και 58.2 % στην περίπτωση της πολυεστερικής ρητίνης.

Επίσης από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε πως η χρήση κενού δεν επιδρά ουσιαστικά στην εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων σε σχέση με μεθόδους που δεν χρησιμοποιούν κενό. Στην περίπτωση της αντοχής σε κάμψη η επίδραση του κενού είναι σημαντική καθώς ο συντελεστής *MOR* για το δοκίμιο *PV* βρέθηκε να έχει την υψηλότερη τιμή από όλα τα δοκίμια πολυεστερικής μήτρας.

Η αντοχή των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν χωρίς την χρήση ενισχυτικού υαλοϋφάσματος, βρέθηκε να είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με ενίσχυση. Τα αποτελέσματα της δοκιμασίας εφελκυσμού στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν αποκλειστικά από ρητίνη, χωρίς ενίσχυση, ήταν αναμενόμενα, με την εποξική ρητίνη να έχει μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό από την πολυεστερική.

Στην περίπτωση των δοκιμίων με χρήση εποξικής μήτρας η παραμόρφωση μεταξύ αυτών στην δοκιμασία κάμψης ήταν της τάξεως του 3.3 % και η διαφορά για τις διάφορες μεθόδους ήταν αμελητέα. Στη περίπτωση των δοκιμίων με χρήση πολυεστερικής μήτρας η παραμόρφωση μεταξύ των διαφόρων δοκιμίων στην δοκιμασία κάμψης, όπως εκφράζεται με τον προσδιορισμό του βέλους κάμψης κυμαίνεται σε 2.9 – 3.6 % και η διαφορά για τις διάφορες μεθόδους φτάνει το 23.5%.

Οι τιμές που προσδιορίστηκαν πειραματικά για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, παρατηρήθηκε ότι είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες που υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις του νηογνώμονα *Lloyds*. Αυτό συμβαίνει επειδή ο νηογνώμονας λαμβάνει υπόψιν καθορισμένους συντελεστές ασφαλείας, διότι επιβάλλεται να χρησιμοποιούνται χαμηλότερες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων κατά το στάδιο της σχεδίασης.

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των δοκιμίων σε μονοαξονικό εφελκυσμό και σε κάμψη έγιναν σε μια πρώτη προσέγγιση (*tentative*), με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος *ANSYS* [20], για να παρατηρηθεί σε γενικές γραμμές η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά τις αντίστοιχες δοκιμασίες, όταν αυτές πραγματοποιούνται υπό ιδανικές συνθήκες.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας μονοαξονικού εφελκυσμού παρατηρήθηκε μια ομοιόμορφη κατανομή των υψηλών τάσεων στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου, ενώ σε ορισμένες περιοχές, μικρής έκτασης, κοντά στη βάση στήριξης του δοκιμίου παρουσιάστηκαν οι υψηλότερες τιμές τάσεων. Η μεγαλύτερη επιμήκυνση παρουσιάζεται στο σημείο εφαρμογής της εφελκυστικής δύναμης και η τιμή της μειώνεται σταδιακά προς την περιοχή στήριξης του δοκιμίου.

Κατά την προσομοίωση της διαδικασίας κάμψης παρατηρήθηκε η υψηλότερη συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή των σημείων στήριξης, ενώ στη μέση του δοκιμίου παρατηρήθηκε επίσης αρκετά υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Η υψηλότερη παραμόρφωση εντοπίζεται στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων προσομοίωσης και προτείνεται να διερευνηθούν λεπτομερέστερα ως συνέχιση της παρούσης εργασίας.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε πως σε κάθε περίπτωση μήτρας η χρήση ελαφροβαρών σφαιριδίων γυαλιού (*glass bubbles*) έχει θετική επίδραση στην αύξηση της αντοχής στον εφελκυσμό καθώς και της αντοχής σε κάμψη. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της επίδρασης κατά τη χρήση πρόσθετων υλικών στην μητρική φάση σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου. Εκτός

από την επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά, η προσθήκη επιπρόσθετων υλικών βρέθηκε ότι αυξάνει το βάρος των δοκιμίων.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας είναι ότι η καταλληλότερη μέθοδος κατεργασίας θα πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με τον τύπο της μήτρας που θα χρησιμοποιηθεί, έτσι ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για δεδομένο τύπο ενίσχυσης, τόσο οι ιδιότητες όσο και η μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού που κατασκευάζεται, καθορίζονται τόσο από τον τύπο της μήτρας όσο και από τη μέθοδο κατασκευής που επιλέγεται.

Ως μελλοντική συνέχεια της εργασίας προτείνεται να διερευνηθεί η επίδραση του είδους και της περιεκτικότητας πρόσθετων υλικών στη μητρική φάση που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του σύνθετου. Επίσης παρουσιάζει ενδιαφέρον να μελετηθεί η χρήση και άλλων μεθόδων κατεργασίας για την κατασκευή του σύνθετου, όπως η μέθοδος έγχυσης υπό κενό (*Vacuum infusion*), ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των διαφορετικών μεθόδων στις μηχανικές ιδιότητες και στη συμπεριφορά του.

Παράρτημα Α

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την χρήση του προγράμματος ANSYS [20] με σκοπό τη δημιουργία αρχικών προσομοιώσεων μονοαξονικού εφελκυσμού και κάμψης αναφέρονται παρακάτω:

- Εκκίνηση του περιβάλλοντος *Workbench* του προγράμματος ANSYS [20]
- Επιλογή του συστήματος *ACP (Pre)* από το *Toolbox (Components systems)* με την μέθοδο *drag and drop*.
- Άνοιγμα της βιβλιοθήκης υλικών του προγράμματος ANSYS [20].
- Διαγραφή προεπιλεγμένου υλικού (*structural steel*) και επιλογή του υλικού *Epoxy-EGlass_Wet*.
- Εισαγωγή νέων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού οι οποίες υπολογίστηκαν από τις σχέσεις 3.1 έως 3.3 για τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού (x,y,z), συμπίεσης (x,y,z) και διάτμησης (xy, yz, xz).
- Στη περίπτωση δοκιμίου αποτελούμενο μόνο από ενισχυτικό υαλοϋφασμα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δίνονται στον πίνακα 2.21 του νηογνώμονα για γυαλί τύπου E.
- Επιπλέον, τροποποιήθηκαν οι τιμές παραμόρφωσης από εφελκυσμό, συμπίεση και διάτμηση έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε υλικό το οποίο έχει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες σε δυο κατευθύνσεις (x,y) λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του υφάσματος που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο.
- Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκκίνηση του *Design Modeler (Geometry)* στο οποίο επιλέχτηκαν πρώτα οι κατάλληλες μονάδες διαστάσεων (*cm*) και έπειτα με την χρήση της εντολής *Import External Geometry File* εισάχθηκε το δοκίμιο το οποίο είχε προηγουμένως σχεδιαστεί με την χρήση του προγράμματος *Rhinoceros* [21].
- Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκε εκκίνηση του *Mechanical (Model)* στο οποίο ορίστηκαν με την εντολή *Create name selection* κύρια σημεία του δοκιμίου (στηρίξη, κύριο σώμα και περιοχή άσκησης δύναμης) για την πιο εύκολη διαχείριση τους. Τέλος, επιλέχθηκε η χρήση πλέγματος ορίζοντας το *Relevance Center* ως *Fine*.
- Έχοντας πραγματοποιήσει τα παραπάνω βήματα πραγματοποιήθηκε εκκίνηση του *ACP – ANSYS composite Pre Post*. Πρώτα έγινε επιλογή του υλικού που ορίστηκε στην βιβλιοθήκη και ορίστηκε το πάχος του υφάσματος (0.0375 cm). Στην συνέχεια δημιουργήθηκε *Stackup* αποτελούμενο από τέσσερις στρώσεις του υφάσματος που είχε δημιουργηθεί προηγουμένως. Ακόμα ορίστηκαν οι ιδιότητες του *Rosette* καθώς και του *Oriented selection set* λαμβάνοντας υπόψη το δοκίμιο στο σύνολο του με σκοπό τον καθορισμό του προσανατολισμού των ινών καθώς επίσης και της διεύθυνσης του πάχους. Τέλος, δημιουργήθηκε *Modelling Group* με σκοπό να οριστεί η απαραίτητη δομή του πολύστρωτου υλικού.

- Έχοντας ορίσει τα απαραίτητα στοιχεία του πολύστρωτου, περάστηκαν τα παραπάνω δεδομένα σε σύστημα *Static structural*.
- Πραγματοποιώντας εκκίνηση του *Mechanical (Model)* στο σύστημα *Static structural* για την περίπτωση μονοαξονικού εφελκυσμού με την εντολή *Fixed Support* ορίστηκε το σημείο στήριξης του δοκιμίου μη επιτρέποντας οποιαδήποτε μετακίνηση. Στην αντίθετη πλευρά με την εντολή *Force* ορίστηκε η θέση και το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης (8000 N). Τέλος, για να εξασφαλιστεί η σωστή διεύθυνση άσκησης της δύναμης στην περιοχή τοποθέτησης της, ορίστηκε με την εντολή *Displacement* ο περιορισμός κινήσεων σε οποιοδήποτε διαφορετικό άξονα από αυτόν της διεύθυνσης της δύναμης (άξονας x).
- Στην περίπτωση κάμψης με την εντολή *Fixed Support* ορίστηκαν δύο σημεία στήριξης ένα σε κάθε πλευρά του δοκιμίου που απείχαν μεταξύ τους 8 cm. Με την εντολή *Force* τοποθετήθηκε δύναμη κάθετη στο επίπεδο xy και παράλληλη στην διεύθυνση -z, με σημείο άσκησης το κέντρο του δοκιμίου.
- Για τη εξαγωγή αποτελεσμάτων ορίστηκε η λύση των *Total Deformation* (στον άξονα x') και *Equivalent stress*.
- Όλα τα παραπάνω βήματα επαναλήφθηκαν για δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από ενίσχυση (γυαλί τύπου E) και για δοκίμια κατασκευασμένα με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση αποτελούμενη από εποξική ή πολυεστερική ρητίνη.

Στην περίπτωση των δοκιμίων που ήταν κατασκευασμένα εξολοκλήρου από μητρική φάση (πολυεστέρας ή εποξική) ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

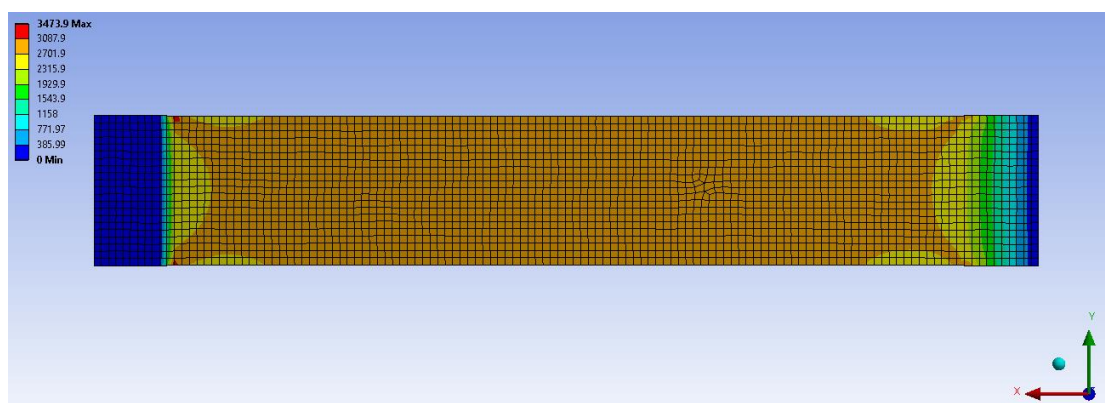
- Εκκίνηση του περιβάλλοντος *Workbench* του προγράμματος *ANSYS* [20]
- Επιλογή του συστήματος *Static structural* από το *Toolbox (Analysis systems)* με την μέθοδο *drag and drop*.
- Άνοιγμα της βιβλιοθήκης υλικών του προγράμματος *ANSYS* [20].
- Διαγραφή προεπιλεγμένου υλικού (*structural steel*) και επιλογή των υλικών *Resin epoxy* και *Resin Polyester*.
- Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκκίνηση του *Design Modeler (Geometry)* στο οποίο επιλέχτηκαν πρώτα οι κατάλληλες μονάδες διαστάσεων (cm) και έπειτα με τη χρήση της εντολής *Import External Geometry File* εισάχθηκε το δοκίμιο το οποίο είχε σχεδιαστεί με την χρήση του προγράμματος *Rhinoceros* [21].
- Πραγματοποιώντας εκκίνηση του *Mechanical (Model)* στο σύστημα *Static structural* για την περίπτωση μονοαξονικού εφελκυσμού με την εντολή *Fixed Support* ορίστηκε το σημείο στήριξης του δοκιμίου, μη επιτρέποντας οποιαδήποτε μετακίνηση. Στην αντίθετη πλευρά με την εντολή *Force* ορίστηκε η ασκούμενη δύναμη. Τέλος, για να εξασφαλιστεί η σωστή διεύθυνση άσκησης της δύναμης στην περιοχή τοποθέτησης της ορίστηκε με την εντολή

Displacement ο περιορισμός κινήσεων σε οποιοδήποτε διαφορετικό άξονα από αυτόν της διεύθυνσης της ασκούμενης δύναμης (άξονας x).

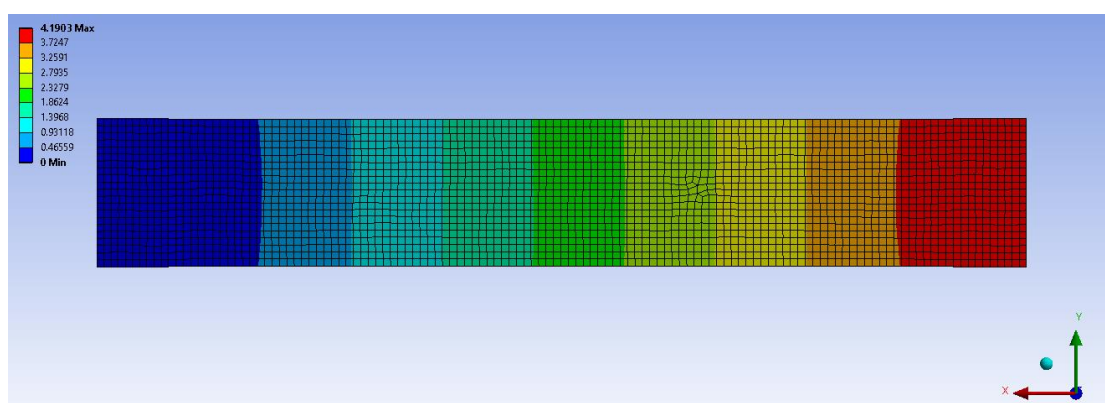
- Για την περίπτωση κάμψης με την εντολή *Fixed Support* ορίστηκαν δυο σημεία στήριξης ένα σε κάθε πλευρά του δοκιμίου. Με την εντολή *Force* τοποθετήθηκε δύναμη κάθετη στο επίπεδο xy και παράλληλη στην διεύθυνση -z, με σημείο άσκησης το κέντρο του δοκιμίου.
- Για τη εξαγωγή αποτελεσμάτων ορίστηκε η λύση των *Total Deformation* (στον άξονα x'x) και *Equivalent stress*.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

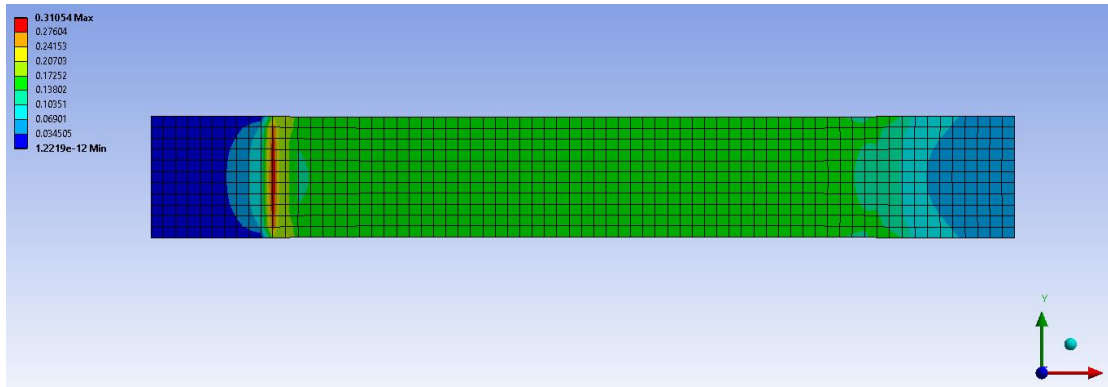
Στις εικόνες A.1 – A.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν από την χρήση του προγράμματος ANSYS [20] για δοκιμασίες μονοαξονικού εφελκυσμού και κάμψης σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιεγράφηκε παραπάνω.



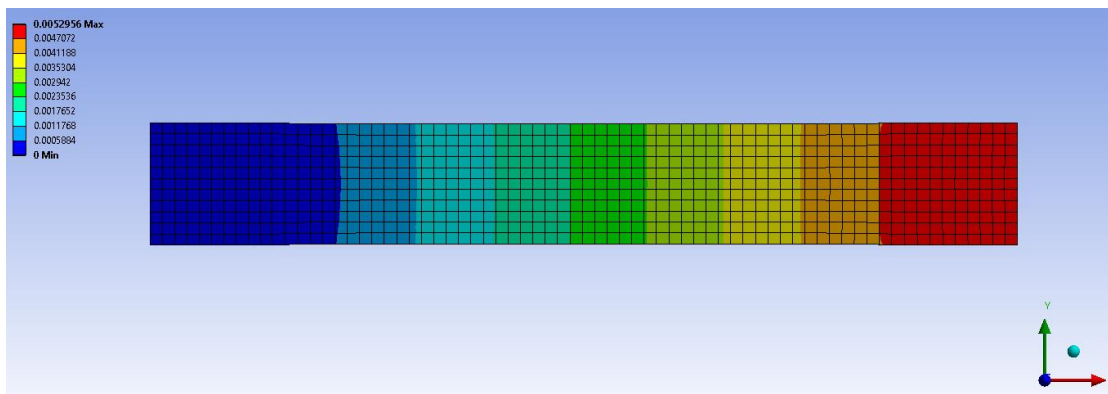
Εικόνα A.1 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από ενίσχυση (γυαλί τύπου E) - κατανομή τάσεων από δοκιμασία εφελκυσμού.



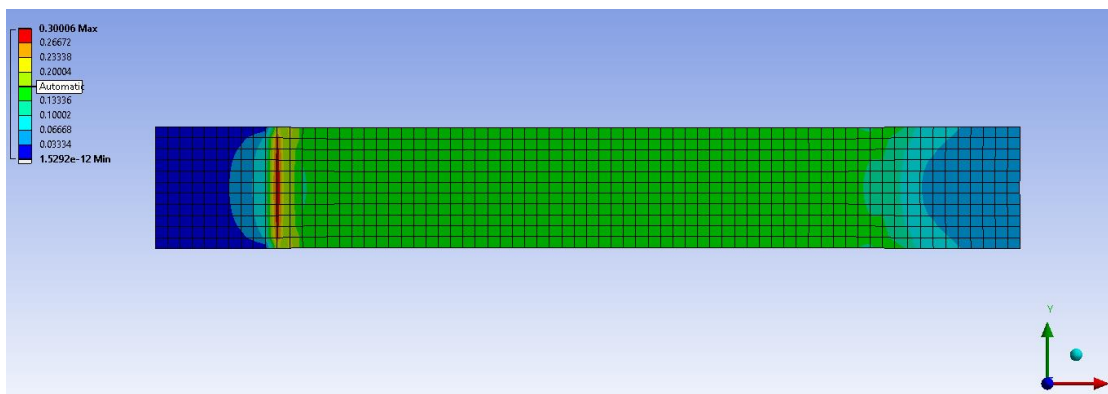
Εικόνα A.2 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από ενίσχυση (γυαλί τύπου E) - κατανομή παραμορφώσεων από δοκιμασία εφελκυσμού.



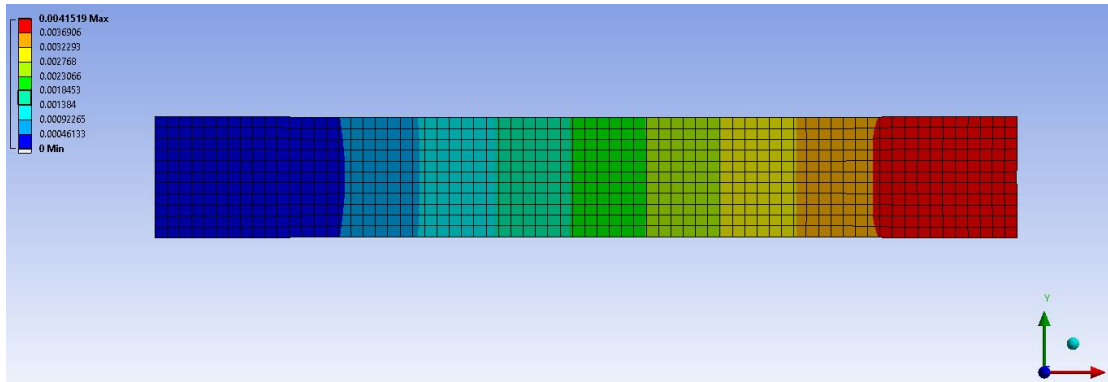
Εικόνα A.3 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (πολυεστέρας) - κατανομή τάσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



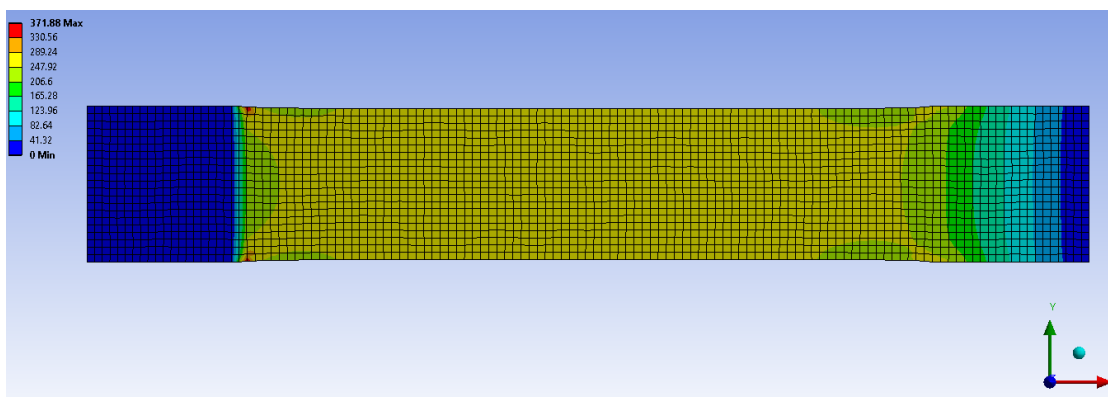
Εικόνα A.4 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (πολυεστέρας) - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



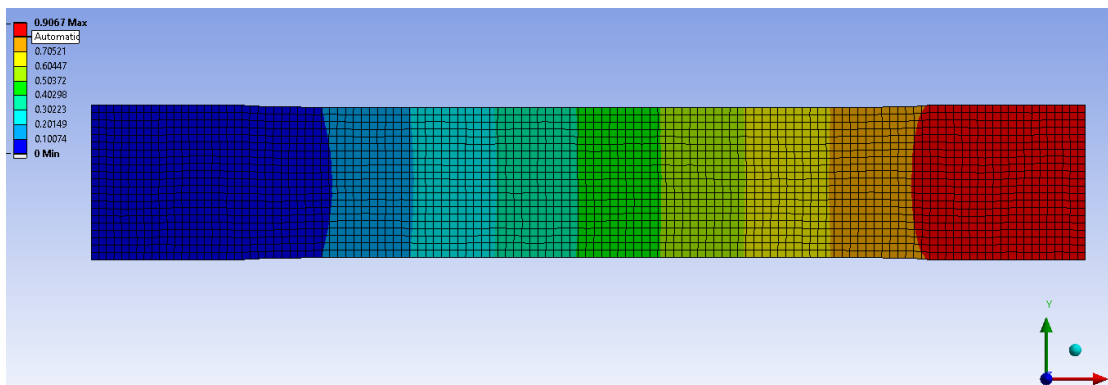
Εικόνα A.5 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (εποξική) - κατανομή τάσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



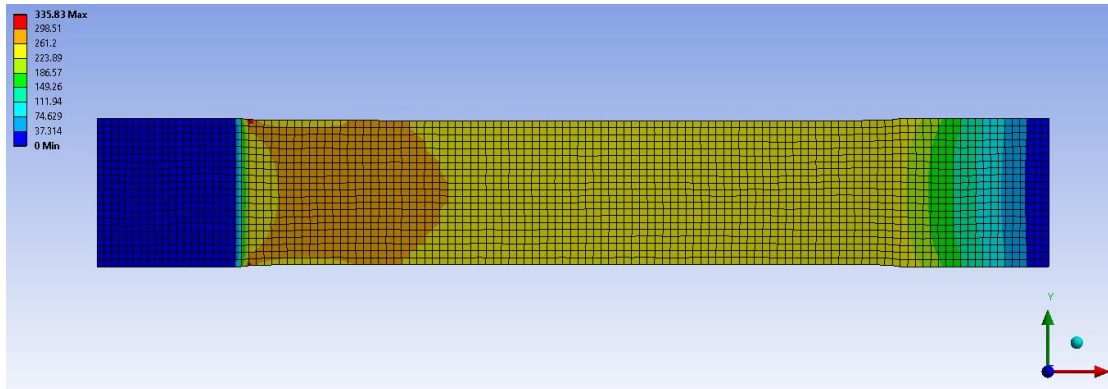
Εικόνα Α.6 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (εποξική) - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



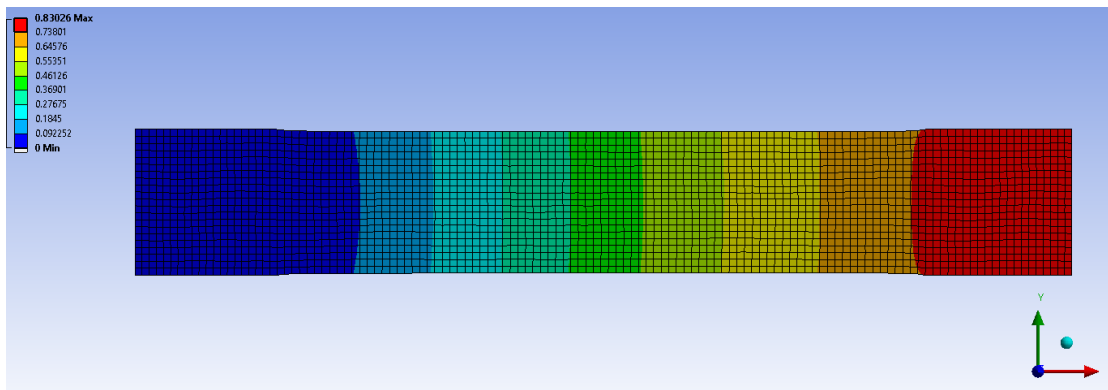
Εικόνα Α.7 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση εποξική ρητίνη - κατανομή τάσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



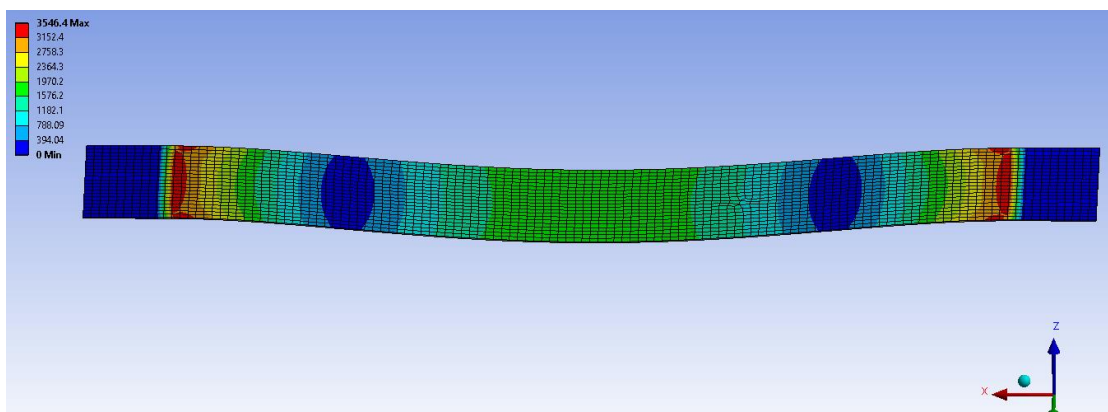
Εικόνα Α.8 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση εποξική ρητίνη - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



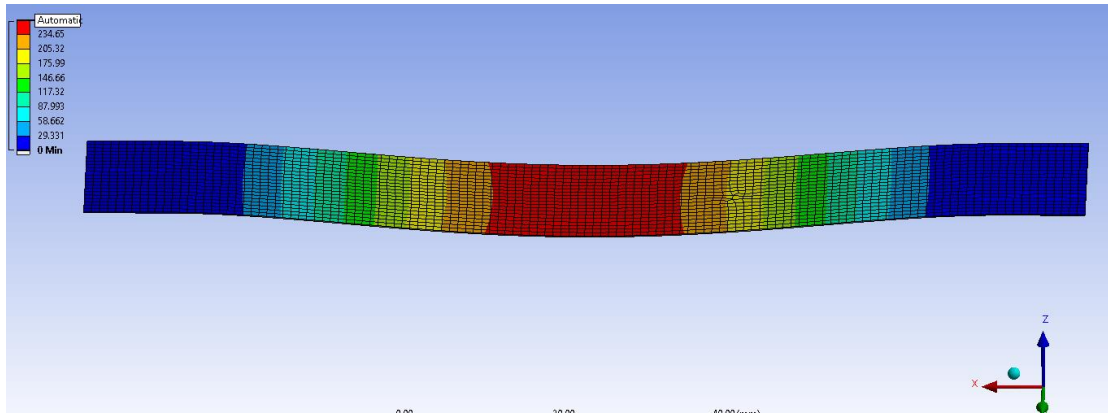
Εικόνα A.9 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση πολυεστερική ρητίνη - κατανομή τάσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



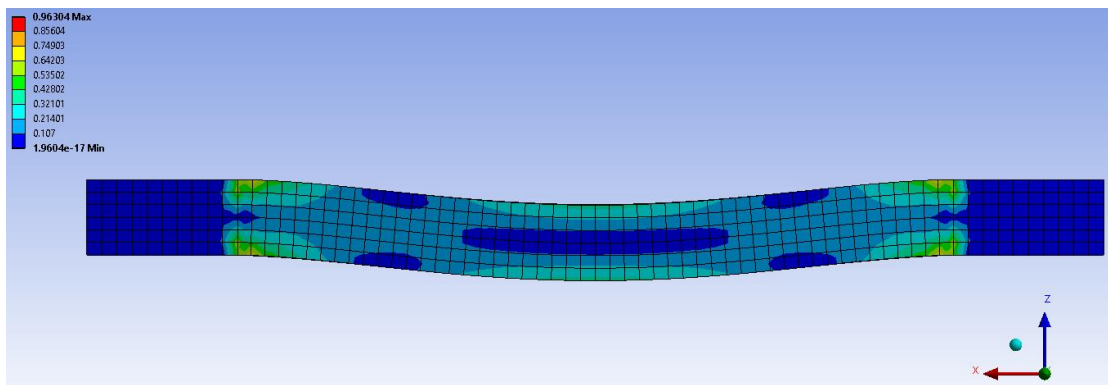
Εικόνα A.10 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση πολυεστερική ρητίνη - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία εφελκυσμού.



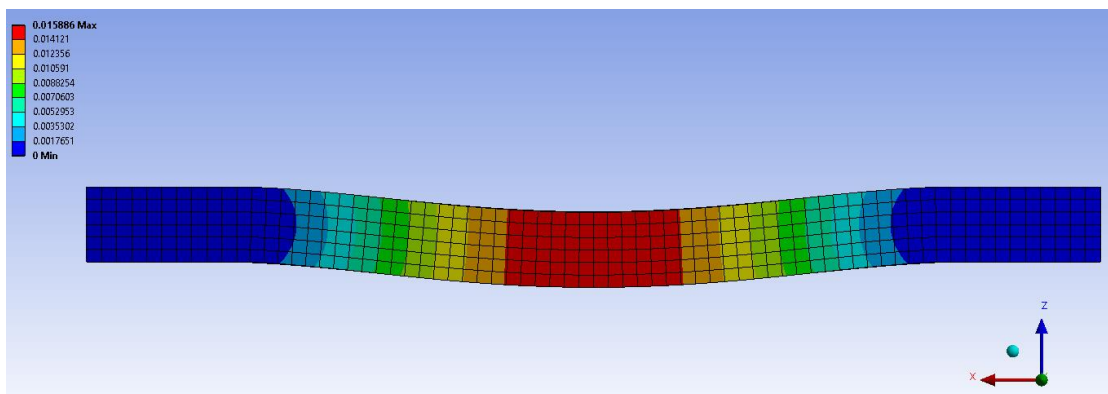
Εικόνα A.11 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από ενίσχυση (γυαλί τύπου E)- κατανομή τάσεων, δοκιμασία κάμψης.



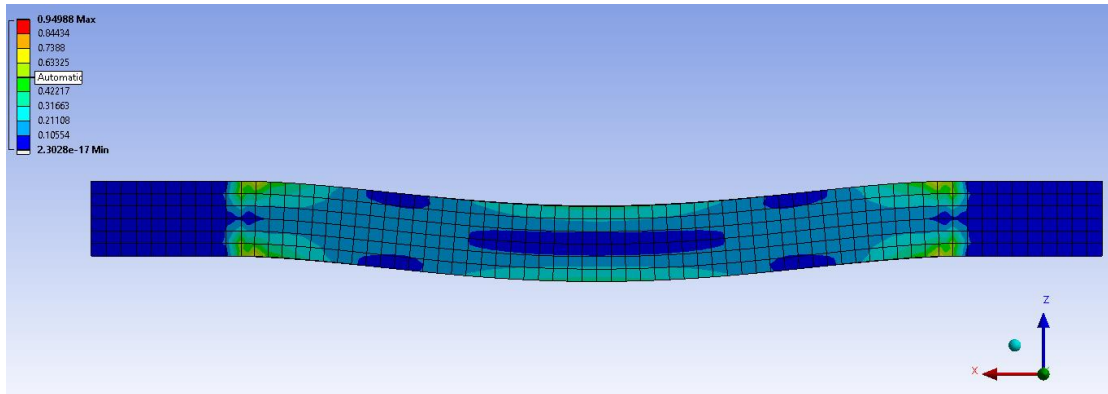
Εικόνα A.12 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου από ενίσχυση (γυαλί τύπου E)- κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία κάμψης.



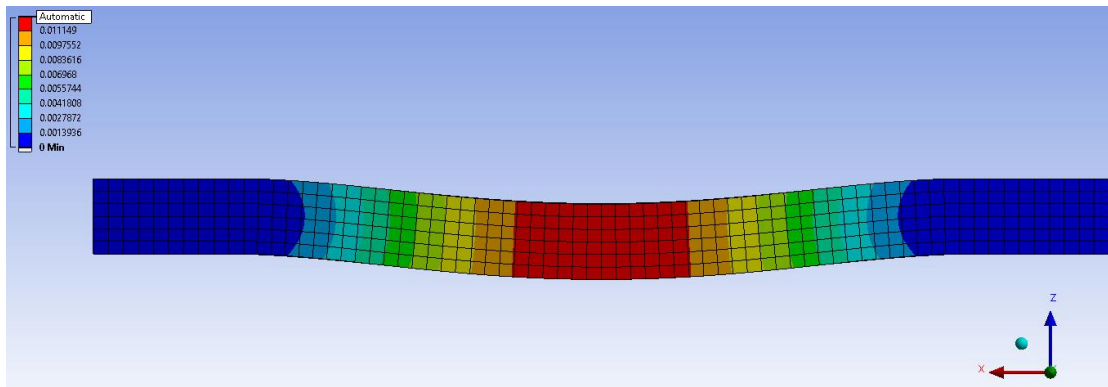
Εικόνα A.13 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (πολυεστέρας) - κατανομή τάσεων, δοκιμασία κάμψης.



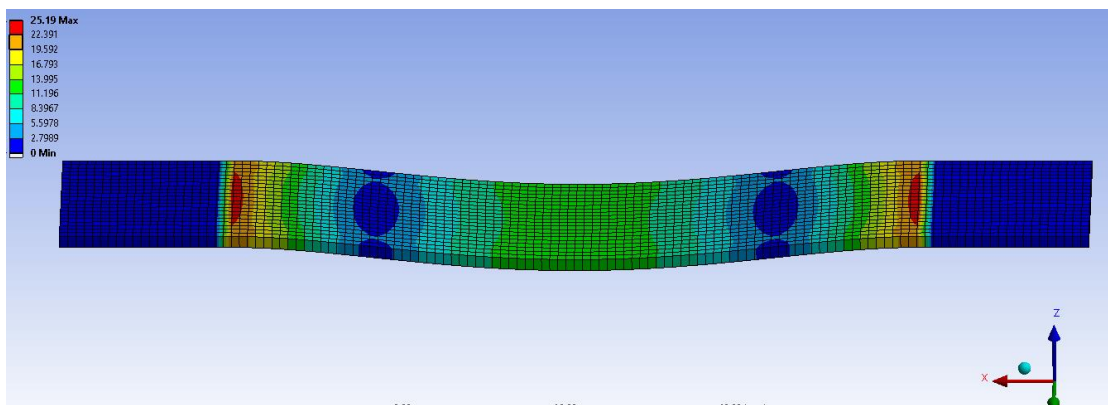
Εικόνα A.14 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (πολυεστέρας) - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία κάμψης.



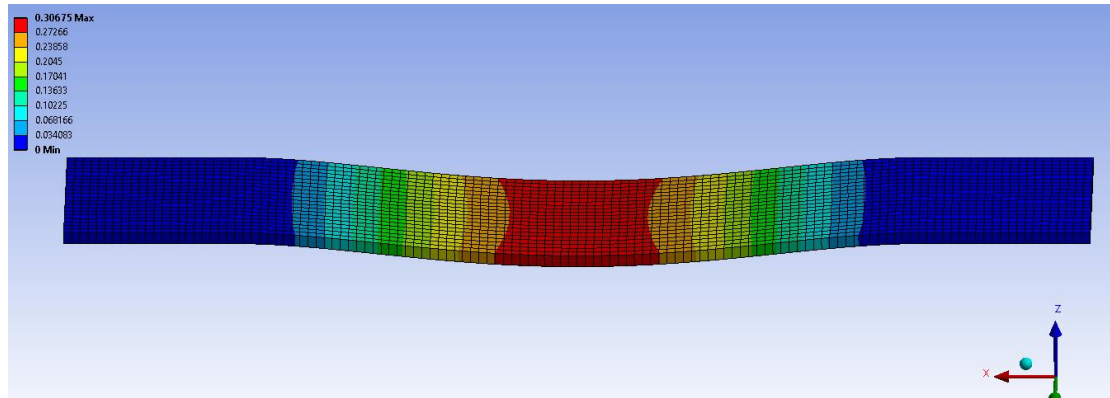
Εικόνα A.15 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (εποξική) - κατανομή τάσεων, δοκιμασία κάμψης.



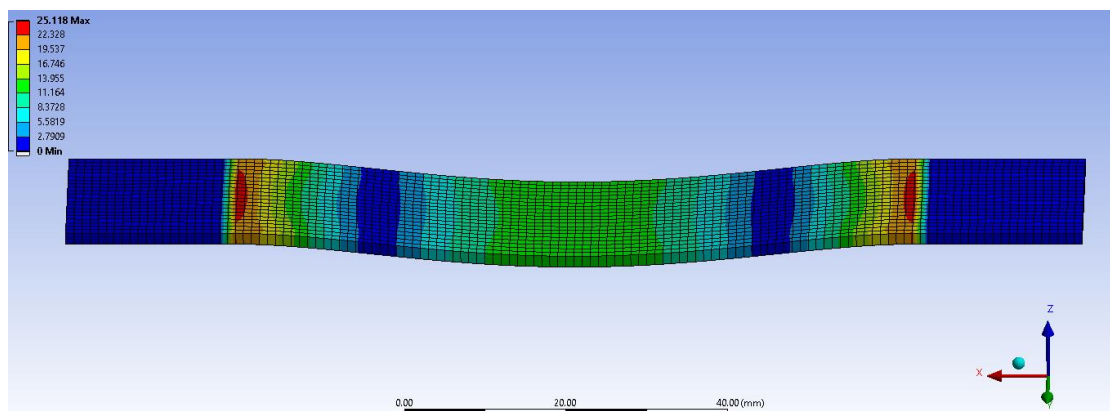
Εικόνα A.16 Δοκίμιο κατασκευασμένο εξολοκλήρου με μητρική φάση (εποξική) - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία κάμψης.



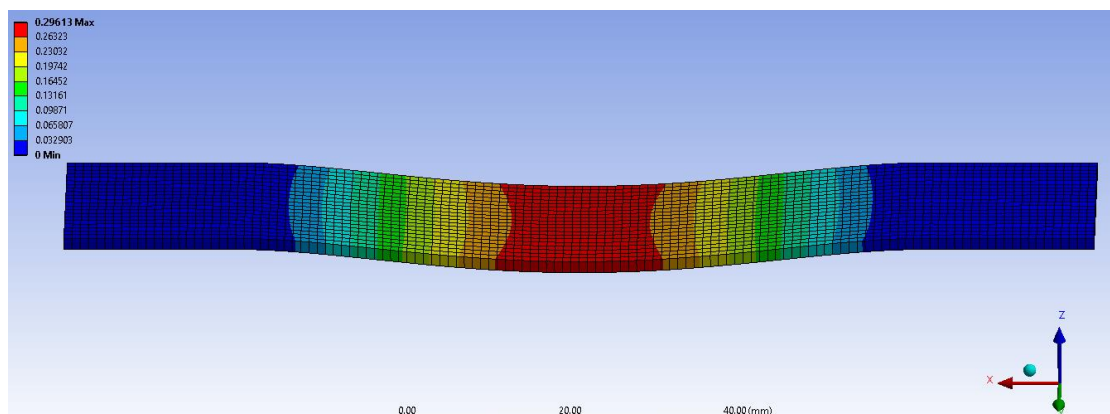
Εικόνα A.17 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση εποξική ρητίνη - κατανομή τάσεων, δοκιμασία κάμψης.



Εικόνα A.18 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση εποξική ρητίνη - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία κάμψης.



Εικόνα A.19 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση πολυεστερική ρητίνη - κατανομή τάσεων, δοκιμασία κάμψης.



Εικόνα A.20 Δοκίμιο κατασκευασμένο με ενίσχυση γυαλιού τύπου E και μητρική φάση πολυεστερική ρητίνη - κατανομή παραμορφώσεων, δοκιμασία κάμψης.

Βιβλιογραφία

1. Τσούβαλης Ν.Γ., “Ανάλυση και σχεδίαση σκαφών από σύνθετα υλικά”, Σημειώσεις από τις Παραδόσεις Μαθήματος, Εκδ. ΕΜΠ (1998).
2. Callister W.D., David J.R., Rethwisch G., “Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών”, Εκδ. ΤΖΙΟΛΑ, 9^η έκδοση, σελ. 541-587 (2016).
3. Barsotti B., Gaiotti M., Rizzo M. Cesare, “Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength”, *Journal of Marine Science and Application*, **19**, 553–566 (2020).
[Online] Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11804-020-00171-1>
[Accessed 7 July 2021]
4. Kotelnikova-Weiler N., Baverel O., Ducoulombier N., Caron J.-F., “Progressive damage of a unidirectional composite with a viscoelastic matrix, observations and modelling”, *Composite Structures*, **188**, 297-312 (2018).
[Online] Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026382231730644X>
[Accessed 7 July 2021]
5. Bureau Veritas; “Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey”, NR 546 DT RO2, (2018).
6. DNV-GL; “DNV GL class programmes (CP)” (2020).
7. Wonjin Na, Dongil Kwon, Woong-Ryeol Yu “X-ray computed tomography observation of multiple fiber fracture in unidirectional CFRP under tensile loading” *Composite Structures*, **188**, 39-47 (2018).
[Online] Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822317329781>
[Accessed 7 July 2021]
8. Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., “Σύνθετα υλικά”, Εκδ. Κλειδάριθμος (2007).
9. Παντελής Δ.Ι., “Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά: πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα υλικά, ξύλο: δομή, ιδιότητες, τεχνολογία, εφαρμογές”, Εκδ. Παπασωτηρίου (2008).

10. Pellicer E., Nikolic D., Sort J., Baró M., Zivic F., Grujovic N., Grujic R., Pelemis S.; “Advances in Applications of Industrial Biomaterials”, Εκδ. Springer (2017).
11. Chena D.H., Masuda K.; “Effects of honeycomb geometry on stress concentration due to defects” *Composite Structures*, **188**, 55-63 (2018).
[Online] Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822317334244>
[Accessed 7 July 2021]
12. Scott R.J., “*Fiberglass Boat Design and Construction*”, 2^d edition, SNAME (1996).
13. Arteiro A., Catalanotti G., Xavier J., Linde P., Camanho P.P., “A strategy to improve the structural performance of non-crimp fabric thin ply laminates”, *Composite Structures*, **188**, 438-449 (2018).
[Online] Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822317339090>
[Accessed 7 July 2021]
14. Pakdel H., Mohammadi B.; “Progressive matrix cracking master curves of mid and outer off-axis plies in CFRP laminates”, *Composite Structures*, **188**, 497-502 (2018).
[Online] Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822317307183>
[Accessed 7 July 2021]
15. Lloyds; “*Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*” (2019).
16. DNV-GL; “*Rules for classification, class programmes, class guidelines, offshore standards and statutory interpretations*” (2020).
17. Wikipedia; “Ship classification society”
[Online] Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_classification_society
[Accessed 7 July 2021]
18. DNV-GL; “*DNV GL rules for classification: High speed and light craft (RU-HSLC)*” (2020).
19. DNV-GL; “*Polyester resin, vinylester resin, gelcoat and topcoat*”, *DNV GL class programmes (CP)* (2016)

20. Ansys | Engineering Simulation Software (Ansys for Students)

[Online] Available from: <https://www.ansys.com/>

[Accessed 7 July 2021]

21. Rhinoceros modelling tools for designers, Version 5 SR13 64-bit.

[Online] Available from: <https://www.rhino3d.com/>

[Accessed 7 July 2021]